



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**NÁVRH ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ STŘEDNÍ TEPLoty
PROUDÍCÍHO VZDUCHU V KANÁLE LIBOVOLNÉHO
PRŮŘEZU**

DESIGN OF DEVICE FOR DETERMINATION OF AIR MEAN TEMPERATURE IN THE CHANNEL WITH
VARIOUS CROSSECTION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vojtěch Tichý

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Bc. Vojtěch Tichý
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Mechatronika
Vedoucí práce:	doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D.
Akademický rok:	2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh zařízení pro měření střední teploty proudícího vzduchu v kanále libovolného průřezu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem je navrhnout zařízení pro měření teploty vystupujícího vzduchu z elektrického stroje. Tato hodnota je velice důležitá pro stanovení celkové tepelné bilance elektrického stroje. Doposud používaný přístup spočívající v měření teploty v jednom bodě průřezu je dosti nepřesný pro stanovení tepelné bilance. Zařízení by mělo být navrženo tak, aby stanovilo střední teplotu na výstupném otvoru elektrického stroje. Jde o poměrně jednoduchý princip, který je však potřebné zpracovat pomocí elektroniky, kterou je třeba navrhnout.

Cíle diplomové práce:

1. Literární rešerše měření teploty proudícího média.
2. Návrh mechanické části zařízení.
3. Návrh elektrické části zařízení.
4. Realizace měření a analýza výsledků.

Seznam doporučené literatury:

ONDRUŠKA, E.; MALOUŠEK, A.: Ventilace a chlazení elektrických strojů točivých. SNTL Praha, 1985.

YUNUS, A.; TURNER, H.; CIMBALA, J.M.: Fundamental of Thermal-fluid Sciences. 3rd edition. McGraw Hill: Anstralia & New Zeland, 2008.

VLACH, R.: Tepelné procesy v mechatronických soustavách. Skripta. VUT Brno, 2009.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Diplomová práce se zabývala návrhem zařízení pro měření střední teploty v kanále libovolného průřezu. V práci byla nejprve shrnuta teorie tepla, tepelného přenosu a proudění tekutin. Teorie byla výhradně zaměřena na nerovnoměrné rozložení teplot v kanále s proudícím vzduchem. Dále byl zpracován obecný přehled o komerčně využívaných teplotních senzorech a vyvíjených senzorech s použitelností na zkoumanou problematiku. Poté bylo plně navrženo a vyvinuto zařízení pro snímání střední teploty v kanálu s proudícím vzduchem pro několik různých průměrů. Zařízení zahrnovalo samotné teplotní čidlo, potřebnou měřicí elektroniku a její programování a jednoduchou aplikaci pro zpracování naměřených dat.

Abstract

Diploma thesis was dealing with design of the device for measuring the mean temperature in a channel of any cross-section. First, the theory of heat, heat transfer and fluid flow was summarized. Theory was focused specially on the uneven temperature distribution in the flowing medium. Furthermore, a general overview of commercially used temperature sensors and developed sensors with applicability to the investigated problematics was elaborated. Then, a device for sensing mean temperature in a flow channel for several different diameters has been fully designed and developed. The device included the temperature sensor itself, the necessary measurement electronics and its programming, and a simple measurement data application.

Klíčová slova

Přenos tepla, střední teplota, teplotní profil, proudění v kanále, teplotní senzor, měření teploty

Keywords

Heat transfer, mean temperature, temperature profile, flow in a channel, temperature sensor, temperature measurement

Bibliografická citace

TICHÝ, Vojtěch. *Návrh zařízení pro měření střední teploty proudícího vzduchu v kanále libovolného průřezu*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116998>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Radek Vlach.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *“Návrh zařízení pro měření střední teploty proudícího vzduchu v kanále libovolného průřezu”* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, které jsou uvedeny v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne 24. května 2019

Bc. Vojtěch Tichý

Poděkování

Mé poděkování patří doc. Ing. Radku Vlachovi, Ph.D. za vedení a konzultace během vytváření této práce. Dále bych chtěl poděkovat lidem z Mechlabu za velice cenné rady při vývoji elektroniky. V neposlední řadě chci poděkovat celé rodině a přátelům za jakoukoliv podporu.

Obsah

Úvod	- 11 -
2 Teplo a teplota	- 12 -
2.1 Přenos tepla	- 12 -
2.1.1 Kondukce.....	- 13 -
2.1.2 Konvekce	- 13 -
2.1.3 Radiace	- 14 -
2.2 Tepelný odpor	- 14 -
2.2.1 Odpor při kondukcí.....	- 15 -
2.2.2 Odpor při konvekci a radiaci	- 15 -
2.3 Tepelná kapacita.....	- 15 -
3 Proudění kapaliny v potrubí	- 17 -
3.1 Laminární a turbulentní proudění.....	- 17 -
3.2 Nucená konvekce	- 19 -
3.2.1 Nusseltovo číslo.....	- 19 -
3.2.2 Prandtlovo číslo	- 20 -
4 Teplotní senzory	- 21 -
4.1 Dotykové senzory.....	- 22 -
4.1.1 Kovový odporový senzor	- 22 -
4.1.2 Polovodičový odporový senzor	- 24 -
4.1.3 Termočlánek	- 25 -
4.1.4 Dilatační senzory	- 26 -
4.1.5 Optické senzory	- 27 -
4.2 Bezdotykové senzory	- 27 -
5 Distribuované senzory	- 29 -
5.1 „Odporový“ drát [10]	- 29 -
5.2 Braggova optická mřížka	- 31 -

5.3	Distribučovaný optický senzor [13] [14].....	- 32 -
5.3.1	Zpětně rozptýlený signál.....	- 32 -
5.3.2	Optická reflektometrie v časové / frekvenční oblasti	- 33 -
6	Návrh senzoru pro měření střední teploty.....	- 35 -
6.1	Požadavky na mechanickou část	- 35 -
6.1.1	Přehled možných materiálů.....	- 35 -
6.1.2	Návrh a výroba čidla	- 37 -
6.1.3	Testování požadovaných vlastností	- 38 -
6.2	Návrh elektroniky	- 41 -
6.2.1	Napájení zařízení	- 41 -
6.2.2	Zpracování signálu z teplotního čidla	- 42 -
6.2.3	Ovládání zařízení	- 43 -
6.2.4	Firmware	- 44 -
6.2.5	Finální výsledek	- 45 -
6.3	Aplikace v Matlabu	- 46 -
6.4	Kalibrace a testování zařízení.....	- 47 -
7	Závěr	- 50 -
8	Seznam použitých zdrojů.....	- 51 -
9	Seznam použitých veličin a konstant.....	- 53 -
10	Seznam zkratk	- 55 -
11	Seznam obrázků a grafů.....	- 57 -
11.1	Seznam obrázků.....	- 57 -
11.2	Seznam Grafů	- 57 -
12	Seznam Příloh na CD.....	- 58 -

Úvod

Měření teploty je nejvíce používaným typem měření fyzikální veličiny. Teplota vyjadřuje stav každého existujícího prvku. Když tedy probíhá měření teploty, je kontrolován systém, který má specifickou funkci, pro kterou jsou některé teploty vyžadovány nebo vyloučeny.

Měření teploty má tedy obrovský význam pro bezpečnost a efektivitu měřeného systému. Konkrétní potřeba měření střední teploty v kanále s proudícím vzduchem vychází z faktu, že teplota po celém průřezu, kdy systém nemá konstantní teplotu, dochází k přenosu tepla, což má za následek nerovnoměrné rozložení teploty proudícího vzduchu. Současné dostupné senzory teploty však často nejsou schopny snímat teplotu po celém průřezu, nýbrž nejčastěji na vnitřní stěně kanálu. Zde je však teplota na svém maximu nebo minimu podle směru přenosu tepla. Proto pro zpřesnění tohoto měření bude takový teplotní senzor navržen.

V rámci rešerše bude popsána problematika měření teploty a její vyhodnocování. Bude proveden výčet komerčně známých senzorů s jejich krátkým popisem vlastností a výhod či nevýhod. Dále budou popsány metody, kdy senzor bude schopen snímat teplotu na velkém rozsahu. Tyto metody slouží v jisté míře jako možné provedení vhodné pro zadání diplomové práce.

V praktické části práce bude navržen samotný teplotní senzor, který bude snímat střední teplotu v kanále s proudícím vzduchem. Tento senzor musí splňovat dvě základní vlastnosti a to ty, že bude nastavitelný na více průměrů a výslednou naměřenou hodnotou má být střední teplota v daném úseku kanálu.

K tomuto senzoru bude navrženo a vytvořeno zařízení, které je schopno zpracovat data ze senzoru a převést je do formy digitálního signálu, jež bude možné buďto pouze vyčítat pro zjištění aktuálního stavu, anebo bude možné zaznamenávat skrze počítačovou aplikaci naměřená data, která mohou být dále zpracována.

2 Teplo a teplota

Teplo je velice specifickým a odlišným druhem energie. Tato energie je specifikována přestupem energie z jednoho prostředí do druhého, kde tyto prostředí mají rozdílnou teplotu, bez které není přenos tepla možný. Tedy přenos tepla probíhá s blízkým okolím. Dalším typem přenosu energie do blízkého okolí je práce. Jelikož jsou to jediné dva způsoby interakce s blízkým okolím, můžeme říci tvrzení, že když energie překračuje hranice systému a nejedná se o teplo, jde o práci. To je výhodné v tom, že přenos tepla dokážeme rozdílem teplot mezi tělesy či prostředím. Základní rovnicí (2.1) pro teplo je:

$$E = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (2.1)$$

kde m je hmotnost tělesa, c je měrná tepelná kapacita a ΔT je rozdíl teplot. Tato rovnice popisuje především energii, kterou těleso buďto přijalo, nebo mu bylo odebráno.

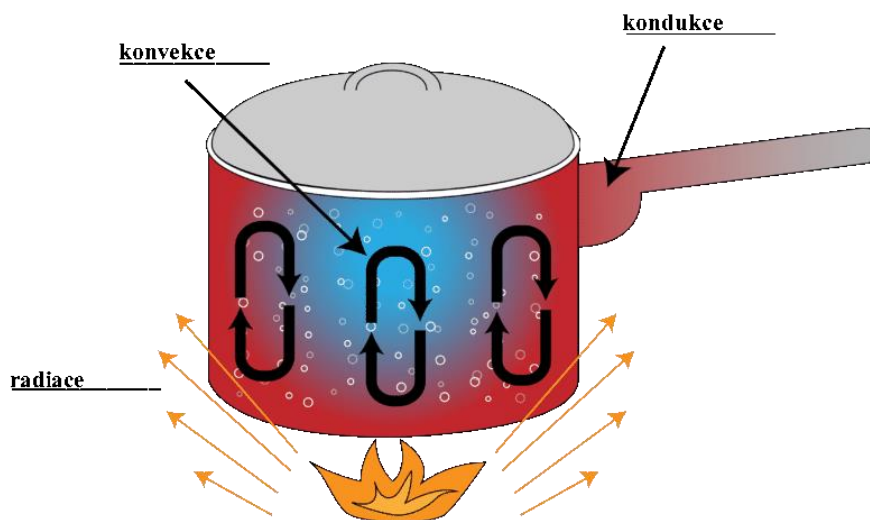
Pro teplo platí tři základní termodynamické zákony. Prvním z nich je zákon zachování energie, kdy energie se může jakkoliv měnit, ale vždy musí výpočet dojít do rovnovážného stavu nebo musí spotřebovaná energie odpovídat energii vyprodukované. Druhý termodynamický zákon popisuje princip přenosu tepla z pohledu směru přenosu. Zde platí všeobecná logika, kdy vždy dochází k přenosu tepla z teplejšího objektu do objektu studenějšího. Třetí termodynamický zákon je známý jako popis čisté látky, tedy kdy entropie a teplota jsou nulové. Entropie je vlastnost systému, která popisuje, jak moc je daný systém uspořádaný na úrovni atomů. [1]

Z fyzikálního hlediska je velice zásadní fyzikální veličina teplota. Teplota vyjadřuje tepelnou energii obsaženou v tělese, která se projevuje jako tlakový rozdíl v hydromechanice, kde se skrze přenos tepla, tedy tepelný tok, snaží teplo vyrovnat hladinu teploty v tělese s jeho okolím. Teplota je považována za veličinu, která určuje kvalitu, provozuschopnost či možné využití pro materiály, systémy a organismy. Další definice teploty je ta, že teplota je určena podle rychlosti pohybu atomů tělesa. Tím se také často určuje tzv. absolutní nula, která má hodnotu 0 K a vyjadřuje, že těleso nemůže přenést žádné teplo. [2] Teplota je nejčastěji měřenou fyzikální veličinou obzvláště díky vypovídajícím hodnotám, které určují stav jevu, který je sledován.

2.1 Přenos tepla

Přenos tepla, neboli tepelný tok q , je hlavní fyzikální veličinou přenosu tepla. Tato veličina vyjadřuje, jak velké množství tepelné energie je přeneseno z jednoho tělesa do druhého za určitý čas. Samotné přenosy tepla dělíme na tři typy mezi něž patří kondukce (vedení), konvekce (proudění) a radiace (sálání). Přestože jsou všechny tyto

typy přenosem tepla, rozdělují se podle výpočetního principu a podle zjištění, který typ se nejvíce na přenosu podílí. Ukázka všech tří typů přenosu tepla je ukázána na obrázku 2.1:



Obrázek 2.1: Demonstrace přenosu tepla kondukcí, konvekcí a radiací [3]

2.1.1 Kondukce

Kondukce neboli vedení tepla je základním přenosem, který se dá jednoduše popsat jako přenos tepla z teplejších objektů do studenějších při vzájemné interakci. To se týká jak pevných látek, kde se tepelná energie projevuje jako vibrace, tak i u tekutin, tedy kapalin a plynů, kde v nich dochází ke kolizím a rozptylu částic. Kondukce se popisuje Fourierovým zákonem (2.2):

$$q_{cond} = -\lambda \cdot S \cdot \frac{dT}{dx} \quad (2.2)$$

kde q_{cond} je tepelný tok vedením, λ je měrná tepelná vodivost materiálu, S je plocha, přes kterou vede tepelný tok a $\frac{dT}{dx}$ je teplotní gradient, který vyjadřuje sklon teplotní křivky v závislosti na tloušťce materiálu, přes který proudí teplotní tok. Kondukci se spíše snažíme zabránit, proto se využívají spíše materiály s nízkou tepelnou vodivostí jako tepelné izolanty. Dobrým tepelným izolantem jsou plyny, dále pěnové materiály nebo dřevo. Naopak velkou tepelnou vodivost má diamant, grafit nebo obecně kovy.

2.1.2 Konvekce

Konvekce popisuje přestup tepla mezi povrchem tělesa a jeho okolní tekutinou, tedy kapalinou nebo plynem. Konvekce vychází z kondukcí a z proudění tekutiny, což

znamená, že při rychlejším proudění tekutiny dochází k vyššímu přestupu tepla konvekcí.

Konvekce se rozděluje na konvekci přirozenou a nucenou. Rozdělení je na základě proudění tekutiny okolo tělesa. Pokud je proudění způsobeno tlakovým rozdílem za pomoci ventilátoru, pumpy nebo větru, je to považováno za nucenou konvekci. Přirozená konvekce je naopak vyvolaná vztlačovými silami, které působí kvůli změně teploty tekutiny a tekutina mění svoji hustotu. Konvekce je obecně vyjadřována tzv. Newtonovým zákonem (2.3) [4]:

$$q_{conv} = -\alpha_q \cdot S \cdot (T_S - T_\infty) \quad (2.3)$$

kde α_q je součinitel přestupu tepla, S je plocha tělesa, které je ochlazováno, T_S je teplota povrchu tělesa a T_∞ je teplota okolí. Nucená konvekce bude více popsána v kapitole 3.2.

2.1.3 Radiace

Radiace je přenosem tepla, kdy je emitována energie z jakéhokoliv tělesa. Tato energie se přenáší formou elektromagnetických vln, popř. fotonů, což znamená, že tepelný přenos probíhá i skrze vakuum. Tomuto přenosu tepla se také říká tepelné záření. U každého prvku k záření dochází jinou měrou. Ideální zdroj záření se nazývá absolutně černé těleso. To také určuje tzv. emisivitu prvku, což je hodnota, kde emisivita rovna jedné odpovídá záření černého tělesa a emisivita rovna nule zase označuje prvek, který neprodukuje žádné teplotní záření. Oba tyto jevy jsou pouze teoretické.

Opačná vlastnost tepelného záření je absorpce. Ta vyjadřuje procentuální množství absorbovaného tepelného záření, které na prvek působí. Černé těleso absorbuje veškeré tepelné záření, proto je jeho absorpce rovna jedné.

Tepelné záření mezi povrchem tělesa a jeho okolím, což může být vzduch či voda, se popisuje Stefan-Boltzmannovým zákonem, který je vyjádřen rovnicí (2.4) [4]:

$$q_{conv} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot (T_S^4 - T_\infty^4) \quad (2.4)$$

kde ε je emisivita prvku, σ je Stefan-Boltzmannova konstanta, S je plocha tělesa, které produkuje tepelné záření, T_S je teplota povrchu tělesa a T_∞ je teplota okolí. Konstanta σ má hodnotu $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^4$.

2.2 Tepelný odpor

Tepelný odpor vyjadřuje závislost mezi tepelným tokem a teplotou. Jednoduše lze tuto závislost vyjádřit rovnicí (2.5):

$$R_T = \frac{\Delta T}{q} \quad (2.5)$$

Jedná se o vlastnost materiálu. Tepelné odpory se liší podle typu přenosu tepla. Nejčastějšími projevy teplotního odporu je odpor proti vedení tepla a povrchový přestup tepla. [4]

2.2.1 Odpor při kondukcí

Tepelný odpor při kondukcí je specifickou veličinou při kondukcí tepla skrze materiál a to pouze v jednom směru. To znamená, že o kondukcí se dá mluvit obzvláště při dostatečně velké ploše stěny nebo u velmi dlouhé tyče. Tepelný odpor zde závisí krom parametrů tělesa i na měrné tepelné vodivosti λ . Tepelný odpor při konvekci se dá po úpravě Fourierova zákona (2.6) napsat jako:

$$R_T = \frac{L}{\lambda \cdot S} \quad (2.6)$$

L vyjadřuje úsek, v jehož směru teče tepelný tok a S je povrch, přes který proudí teplo.

2.2.2 Odpor při konvekci a radiaci

Konvekce a radiace spolu velice úzce souvisí, neboť jde obvykle o přenos tepla mezi tělesem a tekutinou. Odpor při konvekci a radiaci se velice často nazývá povrchovým teplotním odporem. Rovnice je v tomto případě jednodušší kvůli tomu, že jde o přesun tepla pouze mezi dvěma látkami, tedy se uvádí pouze plocha, přes kterou dochází k tepelnému přenosu. Rovnice (2.7) pro povrchový tepelný odpor je:

$$R_T = \frac{1}{\alpha_q \cdot S} \quad (2.7)$$

kde α je součinitel přestupu tepla a S je povrch tělesa. Součinitel přestupu tepla α obsahuje v sobě jak součinitel konvekce, tak i součinitel radiace. Tato kombinace součinitelů se používá z důvodu paralelního průběhu těchto dějů a tím se celý výpočet značně zjednodušuje.

2.3 Tepelná kapacita

Tepelná kapacita se dá chápat jako doba trvání přenosu tepla z okolí do celého tělesa za určitý čas. Jde tedy o dynamický jev u tepelného přenosu. Tepelná kapacita má svou podobnost v elektrické kapacitě, kdy shromažďuje elektrickou energii. Tepelná kapacita určuje, kolik tepla je materiál schopen akumulovat. Doposud byly všechny rovnice počítány pro ustálený stav přenosu tepla. Rovnice, která popisuje akumulaci tepla

znamená, kolik energie je těleso přijmout za jednotku času. Veličinou je tedy stále tepelný tok q , který se nazývá akumulovaný q_{ak} . Rovnice (2.8) pro tento jev tedy vychází přímo ze základní rovnice (2.1) a můžeme ji formulovat takto:

$$q_{ak} = \frac{dE}{dt} = \frac{d(c \cdot m \cdot T)}{dt} = c \cdot \rho \cdot V \cdot \frac{dT}{dt} \quad (2.8)$$

Tato rovnice uvažuje teplo jako pomyslnou tepelnou hladinu tělesa, kde po upravení rovnice je výstupem akumulovaného tepla měrná tepelná kapacita c , hustota ρ a objem V tělesa. Diferenciální vztah v rovnici (2.8) $\frac{dT}{dt}$ popisuje, jak se teplota tělesa mění v závislosti na čase, tedy tento vztah je dynamický prvek rovnice a vytváří z ní diferenciální rovnici prvního řádu. [4]

Tepelná kapacita disponuje i ostatními vlastnostmi elektrické kapacity, konkrétně časovou tepelnou konstantou τ , která určuje dobu trvání, kdy po změně teploty se teplota dostane na úroveň 63.2 % ustálené hodnoty. Tuto hodnotu jednoduše vyjádříme v rovnici (2.9):

$$\tau = \frac{1}{R_T C} \quad (2.9)$$

kde R je tepelný odpor tělesa a C je jeho měrná tepelná kapacita.

Tepelná kapacita je materiálová vlastnost, které se využívá při izolacích, u ohřevových těles nebo chladičů. Nejvyšší hodnoty měrné tepelné kapacity jsou u lehkých plynů, celkově nejvyšší má vodík. Z dostupných materiálů je to voda, dřevo nebo guma. Naopak nejnižší hodnoty mají kovy, jako je platina nebo zlato aj.

3 Proudění kapaliny v potrubí

Proudění tekutin je přítomno v bezpočtu situacích. Setkáme se s ním jak v našem těle skrze cévní systém, ve kterém koluje krev, tak i v potrubích obrovských rozměrů, které přivádí ropu a plyn tisíce kilometrů. Pro proudění tekutiny je podstatné, pokud se jedná o proudění vnitřní či vnější. Proudění v potrubí se řadí mezi vnitřní proudění, kde zjišťujeme, jak se tekutina v potrubí chová. Vnější proudění je vliv tekutiny na objekt, tedy zde je zkoumán vhodný tvar a vlastnosti objektu pro správnou funkci zařízení s využitím proudění tekutiny.

V této kapitole také budeme pracovat s vynuceným prouděním, kde velký vliv má tlaková změna, a nikoliv s prouděním přirozeným, kde je proudění vyvoláno gravitačním působením. Pro teoretický popis a vyjádření základních fyzikálních rovnic budeme používat model ideální tekutiny. Při používání tohoto modelu tekutiny se bude zanedbávat tření tekutiny a její stlačitelnost. Když budeme na reálné situace implementovat tyto vlastnosti, bude se chyba výpočtu od experimentálních výsledků pohybovat v rozptylu 10 %, což při zjednodušení všech procesů je přijatelné a tolerovatelné. Při tření se mění teplota tekutiny. Tato změna je ale v mnoha případech velice malá, proto se také zanedbává. [1]

Pro základní popis proudění ideální tekutiny jsme schopni určit střední rychlost proudění. Ta se určuje z důvodu rozdílných rychlostí, kdy u stěny potrubí je rychlost nulová až po střed, kde je rychlost vždy nejvyšší. Tento jev bude popsán v další kapitole. Rovnici pro výpočet střední rychlosti můžeme získat ze zákona zachování hmotnosti. Budeme zde uvažovat proudění v potrubí kruhového průřezu. Rovnice (3.1) střední rychlosti ideální tekutiny v kruhovém potrubí je:

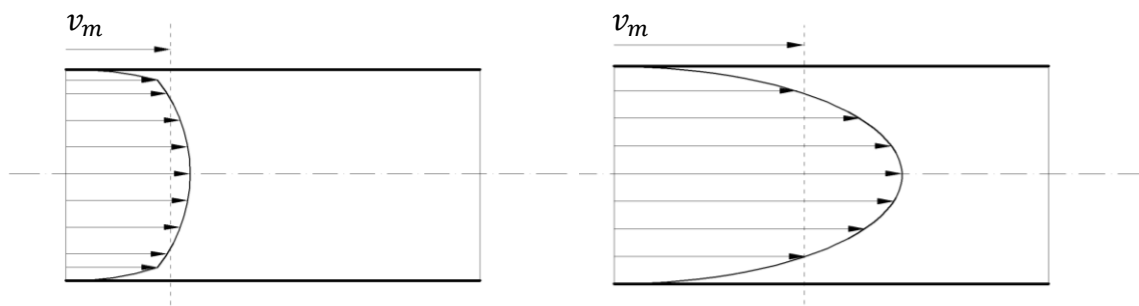
$$v_m = \frac{\int_{S_c} \rho u(r, x) dS_c}{\rho S_c} = \frac{2}{r_c^2} \int_0^R u(r, x) r dr \quad (3.1)$$

kde v_m je střední rychlost proudění, ρ je hustota tekutiny, S_c průřez potrubím, r_c je jeho poloměr a $u(r, x)$ je rychlostní profil tekutiny v potrubí. [1]

3.1 Laminární a turbulentní proudění

Během proudění v kanálu se projevuje jedna ze základních vlastností tekutin, což je viskozita tekutiny neboli vazkost. Ta popisuje třecí síly jak v tekutině, tak i při interakci se stěnou kanálu. Touto vlastností je určen rychlostní profil, který má 2 základní ustálené tvary, které se nazývají laminární a turbulentní. Laminární a turbulentní

proudění se od sebe odlišují v mnoha aspektech. Rychlostní profily obou typů proudění jsou zobrazeny na obrázku 3.1:



Obrázek 3.1: Rychlostní profil turbulentního (vlevo) a laminárního proudění

Laminární proudění je stabilní, proudnice, tedy trajektorie tekutiny, jsou jednoduché a přímé a celkově je pohyb tekutiny uspořádaný. Tento jev pozorujeme v trubkách malých průměrů, nízké rychlosti proudění a při větší viskozitě tekutiny. Zato proudění turbulentní je přesný opak, tedy není daný jasný řád proudění a proudnice jsou chaotické. Turbulentní proudění je mnohem častějším jevem v praxi, jelikož se vyskytuje při vyšších rychlostech proudění, vyšších průřezích kanálu a tekutiny, které proudí, mají spíše nižší hodnotu viskozity. Existenci tohoto jevu zjistil britský vědec Osborne Reynolds, který zkoumal rozdíly mezi laminárním a turbulentním prouděním kapalin. [1]

Reynolds též zkoumal rozdílné vlastnosti a na čem nejvíce závisí to, že se jedná o konkrétní typ proudění. Celkově je způsob proudění tekutiny závislé na mnoha parametrech, mezi něž patří geometrie potrubí, struktura a teplota jeho povrchu, rychlost proudění nebo typ tekutiny. Reynolds však zjistil, že nejvíce je způsob proudění závislý na poměru setrvačné síly tekutiny a jeho viskozitě. Tento poměr se nazývá Reynoldsovo číslo a vztah je uveden v rovnici (3.2):

$$Re = \frac{v_m D_H}{\vartheta} \quad (3.2)$$

kde v_m je střední rychlost tekutiny, D_H je hydraulický průměr kanálu a ϑ je viskozita tekutiny. Reynoldsovo číslo je bezrozměrné. Hydraulický průměr závisí především na tvaru kanálu. Za ideální tvar je považován kruhový průřez. To je ošetřeno v rovnici (3.3):

$$D_H = \frac{4S_c}{o} \quad (3.3)$$

kde o označuje obvod tvaru kanálu. [4]

Přestože známe hodnoty pro výpočet Reynoldsova čísla, neznamená to exaktně, že dané proudění je laminární nebo turbulentní. To se v praxi nedá jasně definovat. Pro

proudění v kanále kruhového průřezu se většinou uvádí hodnota $Re_{cr} = 2300$, což je kritické Reynoldsovo číslo, které určuje hranici mezi prouděním turbulentním a laminárním. Za přechodové pásmo se považuje pásmo kritického Reynoldsova čísla od 1800 do 4000, kde nejsme schopni jasně určit typ proudění tekutiny.

3.2 Nucená konvekce

Již v předchozí kapitole bylo zmíněno, že nucená konvekce je vyvolána vnější tlakovou změnou vyúsťující ve zrychlené proudění okolo tělesa a tím i rychlejší tepelný přenos. Z pohledu fluidní mechaniky a přenosu tepla se právě v tomto odvětví prolínají oba vědní obory.

Nucená konvekce a její parametry se určují podle několika veličin, podle kterých se určuje přibližný tok tekutiny a tepelný tok v tekutině. První z nich je Reynoldsovo číslo, podle nějž se určuje typ proudění, což má vliv i na tepelné proudění. Další jsou Nusseltovo číslo a Prandtlovo číslo, která jsou popsána níže. Za nejpodstatnější číslo se dá označovat Nusseltovo číslo, které získáme vztahem (3.4):

$$Nu = k \cdot Re^m \cdot Pr^n \quad (3.4)$$

Konstanta k , m a n jsou experimentálně určené konstanty pro kombinace různých průřezů kanálu a tekutiny, která jimi proudí. Tabulka některých kombinací a výsledných hodnot je uvedena v příloze. [1]

3.2.1 Nusseltovo číslo

Nusseltovo číslo je mimo rovnici (3.4) definováno jako poměr přenosu tepla konvekcí tělesa α_q a kondukcí tekutiny λ . Tato definice je popisem rovnice (3.5):

$$Nu = \frac{\alpha_q \cdot D_H}{\lambda} \quad (3.5)$$

D_H je hydraulický průměr kanálu. Nusseltovo číslo je podílem konvekce mezi tekutinou a tělesem a kondukce tělesa podle rovnic (2.2) a (2.3). Nusseltovo číslo je bezrozměrnou veličinou, která je používána především pro určení úrovně působení konvekce oproti působení kondukce, což by se dalo přeformulovat do příkladu, kdy se chladičem snažíme účinně chladit zařízení, které je nadměrně zahříváno. Při nedostatečném chlazení je Nusseltovo číslo vyšší a bez chlazení (i bez přirozené konvekce) bude Nusseltovo číslo rovno 1.

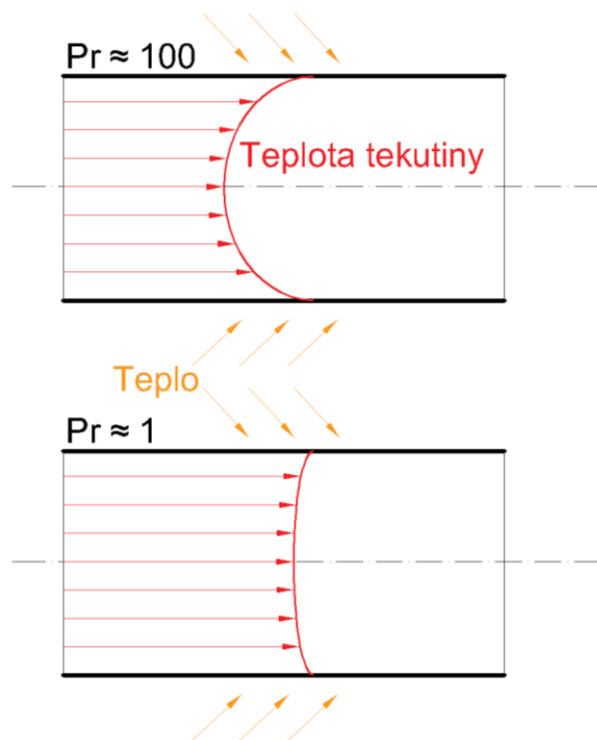
Nusseltovo číslo nejlépe popisuje proudění a přenos tepla v kanále. Seznam používaných kombinací kanálu a jím proudících tekutin je uveden v příloze.

3.2.2 Prandtlovo číslo

Prandtlovo číslo je bezrozměrnou veličinou a popisuje poměr mezi viskozitou tekutiny ϑ a její tepelnou difuzivitou. Tepelná difuzivita vyjadřuje přibližnou prohřevnost v samotné tekutině. Přibližná prohřevnost je popsána jako poměr mezi měrnou tepelnou vodivostí λ a schopností akumulace tepla tekutinou, což je určeno hustotou tekutiny ρ a jeho měrnou tepelnou kapacitou c . [1] Z těchto hodnot tedy určíme rovnici pro výpočet Prandtlova čísla:

$$Pr = \frac{\vartheta}{\frac{\lambda}{\rho \cdot c}} \quad (3.6)$$

Toto číslo tedy popisuje pouze tekutiny a ne jejich interakci s tělesy či čímkoliv. Touto materiálovou konstantou je popisován jev v tekutině, kdy při proudění v kanále je teplota nerovnoměrně rozložená po průřezu. Tedy určuje, jak při ohřevu tekutiny skrze kanál se bude prohřívat i tekutina uvnitř.



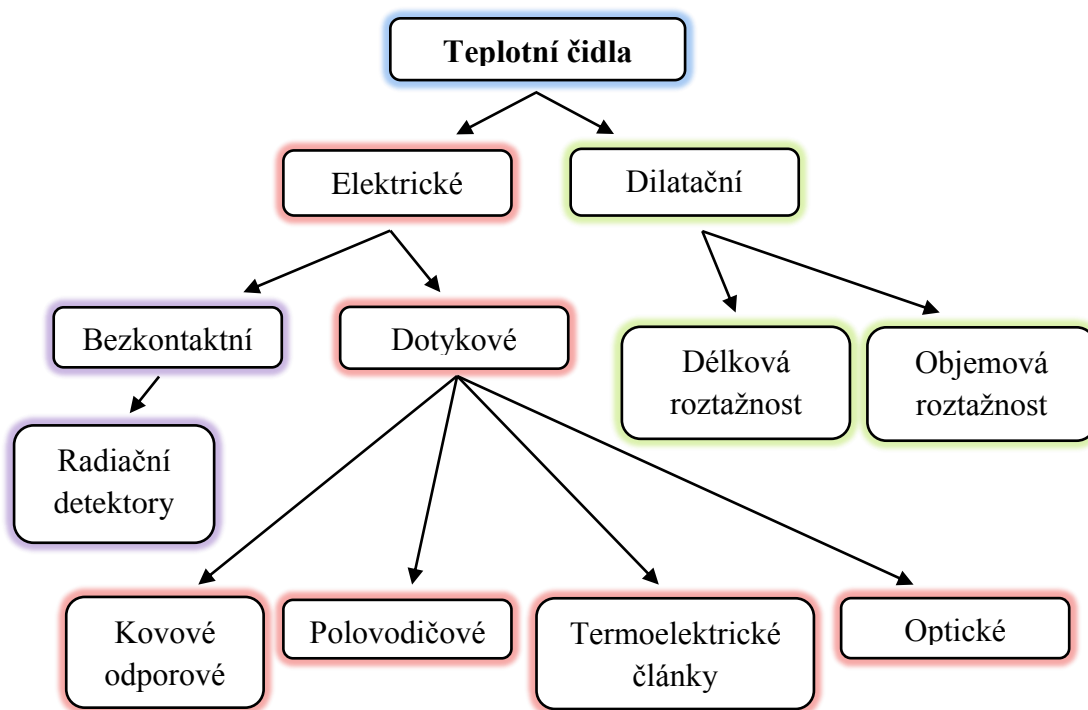
Obrázek 3.2: Ukázka teplotního profilu proudící tekutiny při ohřevu

Obrázek 3.2 ukazuje, jak se mění v proudící tekutině teplota při vnějším ohřevu kanálu v závislosti na Prandtlově čísle. Při vyšší hodnotě viskozity nebo nižší hodnotě tepelné vodivosti je Prandtlovo číslo vyšší, což je případ oleje ($Pr \approx 2000$) a přesný opak nastává u roztaveného kovu, kde se hodnota Pr pohybuje v rozmezí $0.01 - 0.1$.

4 Teplotní senzory

Teplotní senzory nebo jinak snímače teploty jsou funkčním prvkem tvořícím jeden celek, který je do jisté míry součástí měřené oblasti. Přesnějším a konkrétnějším pojmem je čidlo teploty, což je již specifická část senzoru, která převádí teplotu na jinou měřitelnou veličinu, což je velice často elektrické napětí. Zjišťování teploty je nejčastějším druhem měření fyzikální veličiny v technické praxi. Je to z důvodu ovlivňování velké škály úkonů, procesů a v mnoha odvětvích teplota určuje spolehlivost nebo současný stav zařízení. V praxi je mnoho komerčně vyráběných senzorů, které respektují názvosloví dle platné normy ČSN 25 8005, která platí již od 1.8.1989. [5]

Dělení těchto senzorů je dle měřené fyzikální veličiny, fyzikálního principu nebo dle pozice senzoru vůči měřené oblasti. V této práci jsou postupně rozlišeny senzory podle pozice vůči měřenému prostředí, tedy na dotykové a bezdotykové senzory, následně pak dle fyzikálního principu a měřené fyzikální veličiny. Tato kapitola je shrnutím komerčně vyráběných typů senzorů, které se běžně v praxi využívají. Přehled některých typů snímačů je uveden na obrázku 4.1:



Obrázek 4.1: Rozdělení teplotních čidel

4.1 Dotykové senzory

Nejlevnější a zároveň nejvíce rozšířenou skupinou senzorů jsou dotykové senzory. Tedy jejich základním principem je přímý kontakt s měřeným prostředím, součástí nebo s konkrétním materiálem. Díky obrovskému množství typů senzorů je možné měřit velmi rozsáhlé spektrum teplot v jakémkoliv prostředí.

4.1.1 Kovový odporový senzor

Stavebním kamenem funkčnosti odporových čidel teploty je teplotní závislost odporu kovu. Tato hodnota je jedna z mnoha konstant každého materiálu a je nazývána jako teplotní součinitel odporu α . Tedy kovový odporový senzor se řadí mezi elektrické senzory, které převádí teplotu na elektrické napětí, které je měřitelné. Mezi nejzákladnější materiály využívané jako odporový senzor patří platina, nikl, měď nebo Ni-Fe. Další konstantou, která se využívá u odporových senzorů je poměr W , kde R_{100} je odpor kovu při teplotě 100 °C a R_0 je odpor kovu při teplotě 0 °C:

$$W_{100} = \frac{R_{100}}{R_0} \quad (4.1)$$

Často se používá právě hodnota W_{100} , jelikož nad 100 °C se již odporové senzory nechovají lineárně. V tomto rozsahu (od 0 do 100 °C) lze s malou odchylkou říci, že hodnota elektrického odporu jde popsat rovnicí (4.2):

$$R_T = R_0(1 + \alpha \cdot T) \quad (4.2)$$

kde R_T je odpor odpovídající teplotě T . Lineární rozsah u různých materiálů se lehce liší. Experimentálně můžeme stanovit hodnotu teplotního součinitele odporu α , kde vycházíme z rovnice (4.3). Za hodnotu x lze dosadit libovolnou hodnotu v daném lineárním rozsahu. Nejčastěji se pro výpočet využívá hodnota R_{100} .

$$\alpha = \frac{R_x - R_0}{x \cdot R_0} \quad (4.3)$$

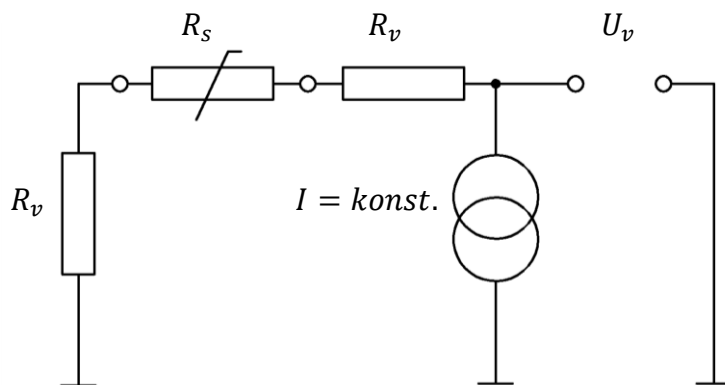
Tato rovnice (4.3) se velice snadno dá upravit do rovnice (4.4), kde již můžeme z odporu R_t získat hodnotu teploty měřeného bodu v lineární oblasti senzoru, tedy:

$$t = \frac{R_t - R_0}{\alpha \cdot R_0} \quad (4.4)$$

Nevýhodou při použití odporového snímače je jeho ovlivnění procházejícím proudem. Snímač je tedy sám tímto proudem zahříván. To vychází z rovnice (4.5) ztrátového výkonu:

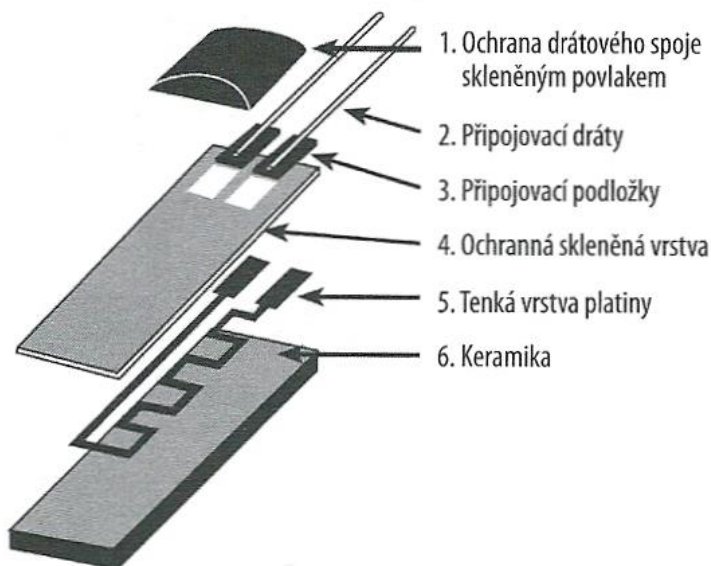
$$q = R_t I^2 \quad (4.5)$$

Pokud jde o samotné získávání teploty, je také potřeba respektovat kromě malé hodnoty proudu vliv odporu vedení, což se dá vykompenzovat tzv. třívodičovým zapojením částečně či čtyřvodičovým zapojením úplně. Velmi důležité je také linearizovat naměřené hodnoty. To se dá provést jak analogově nebo softwarově. Jednoduché schéma zapojení kovového odporového senzoru bez kompenzace vedení je nakresleno na obrázku 4.2. R_S je odpor čidla a R_v je odpor vedení. U_v je něžená hodnota napětí.



Obrázek 4.2: Schéma jednoduchého zapojení teplotního čidla

Platinový senzor Pt100 je z těchto materiálů nejvhodnější. Svou stabilitou, přesností a opakovatelností měření je tento typ považován za nejlepší mezi teplotními senzory. Struktura tohoto senzoru je ukázána na obrázku 4.3:



Obrázek 4.3: Odporové platinové čidlo [6]

Skládá se z keramického či skleněného kusu, na kterém je umístěn velmi tenký platinový drát ve tvaru meandru a ten je potažen ochrannou dielektrickou vrstvou. Bývá někdy i vložen do kovového pouzdra. Vyrábí se také vinuté válcovité senzory s podobným technologickým provedením. Pt100 je schopen snímat teploty od $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ až po $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ a u vyšších tříd dokáže měřit až po teplotu $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Niklové senzory teploty jsou levnější variantou odporového senzoru. Oproti Platinovému čidlu mají také výhodu ve vyšší citlivosti a malé časové konstantě při teplotním skoku. Niklové senzory mají při vyšších teplotách vyšší nelinearitu a celkově jsou méně stabilní. Jejich rozsah teploty se pohybuje v rozmezí od -60 do $180\text{ }^{\circ}\text{C}$. [7]

Nejméně používaný materiál pro odporový senzor je měď. Její rozsah je v rozmezí -200 až $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kvůli nízké rezistivitě se ovšem příliš nepoužívá, jelikož na stejné rozlišení jaké má platinový senzor by bylo potřeba mnohem více materiálu nebo tenčí vedení. Samotná měď také snadno podléhá oxidaci. Komerční využití nalézá pouze u měření teploty v elektromotorech, kde se přímo dá měřit teplota vinutí motoru.

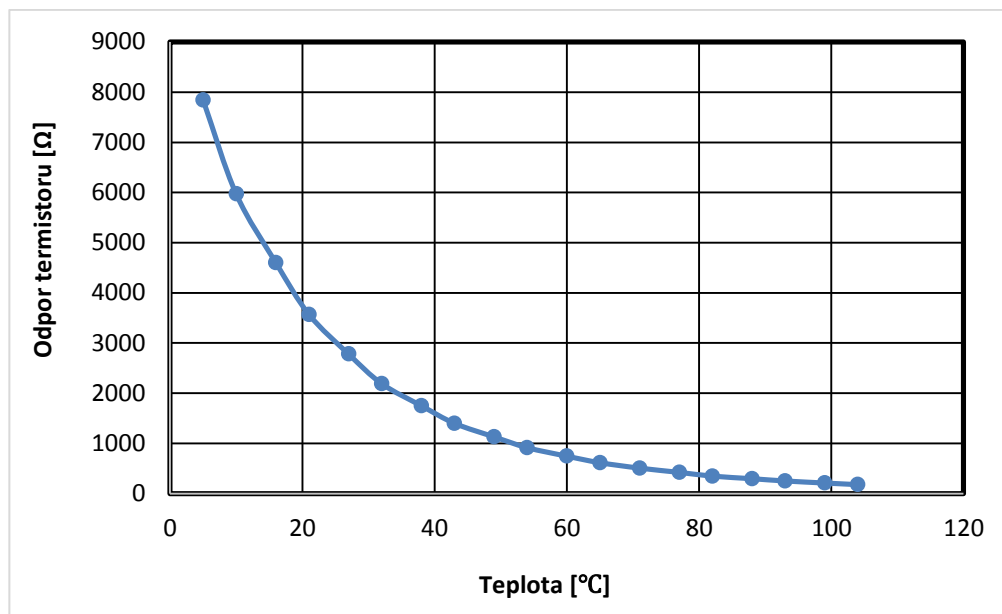
4.1.2 Polovodičový odporový senzor

Polovodičové odporové senzory (termistory) pro měření teploty využívají stejně jako kovová čidla závislost odporu na teplotě. Závislost na teplotě vychází z koncentrace nosičů náboje. Hodnotu součinitele teplotního odporu pro termistory získáváme tedy z rovnice (4.6):

$$\alpha_T \approx -\frac{\Delta E}{2kT} \cdot \frac{1}{T} \quad (4.6)$$

kde ΔE popisuje šíři mezery mezi energetickými hladinami a k je boltzmannova konstanta. Termistory se dále dělí na negastory a pozistory podle záporné či kladné závislosti na teplotě a na monokrystaly. Nejrozšířenějším typem termistoru je NTC (negative temperature coefficient) tedy tzv. negastor, který se v mnoha literaturách označuje za termistor. V této práci je popsán pouze negastor, proto se dále bude používat pouze název termistor.

Výhodou termistorů je jejich vysoká citlivost a malé rozměry, čímž jsou termistory hojně využívány. Nevýhodou je nelineární charakteristika závislosti teploty na odporu, která je uvedena v grafu 4.1:



Graf 4.1: Závislost odporu termistoru na teplotě [8]

Ta se často linearizuje buď hardwarově přes vhodnou síť odporů, nebo přímo softwarovým zpracováním a vyčítáním z uložených dat.

4.1.3 Termočlánek

Termoelektrické články využívají pro měření teploty Seebeckův jev. Jedná se o fyzikální jev, kdy se v obvodu s dvěma různými vodiči nebo polovodiči, které mají na místech spojů rozdílnou teplotu, generuje proud a napětí. Princip Seebeckova jevu je zakreslen na obrázku 4.4:



Obrázek 4.4: Seebeckův jev u termoelektrického článku

Výhodou termoelektrických článků je jejich nízká cena, celkově vysoká přesnost a možnost měření vysokých hodnot. Senzor se také řadí mezi aktivní teplotní senzory, tedy že díky změně teploty je zdrojem napětí.

Podle normy IEC 581.1 jsou stanoveny termoelektrické materiálové páry, které se používají po celém světě a jsou normalizovány. V tabulce 4.1 jsou popsány ty nejzákladnější z nich:

Tabulka 4.1: Základní údaje o některých typech termoelektrický článků [9]

Označení	Složení	Rozsah senzoru [°C]		Termoelektrický koeficient α [$\mu V/^{\circ}C$]		
		dlouhodobě	krátkodobě	při 100 °C	při 500 °C	při 1000 °C
K	NiCr (+)	(0 ; 1100)	(-180; 1350)	42	43	39
	NiAl (-)					
T	Cu (+)	(-185; 300)	(-250; 400)	46	-	-
	CuNi (-)					
J	Fe (+)	(20; 700)	(-180; 750)	54	56	59
	CuNi (-)					
S	PtRh10 (+)	(0; 1550)	(-50; 1750)	8	9	11
	Pt (-)					
R	PtRh13 (+)	(0; 1600)	(-50; 1700)	8	10	13
	Pt (-)					
B	PtRh30 (+)	(100; 1000)	(100; 1820)	1	5	9
	PtRh6 (-)					

Při měření termoelektrickým článkem je velmi podstatným prvkem kompenzace teploty studeného konce, což znamená, že během měření může skrze vedení docházet k zahřívání studeného konce. To způsobuje odchylky měření nebo kolísání hodnot. Měření je prováděno před diferenciální hodnotu mezi oběma konci termočlánku, proto je potřeba nejlépe tyto odchylky odstranit nebo je kompenzovat. Kompenzace lze provést opět hardwarově nebo softwarově. Hardwarové řešení obsahuje další tepelně závislou elektronickou součástku, což může být dioda, kde se dá použít teplotní závislosti charakteristiky PN přechodu nebo softwarově použitím termostatu.

4.1.4 Dilatační senzory

Dilatační senzory patří do kategorie mechanických senzorů, kde se teplotní hodnota nepřevádí na elektrické veličiny, ale hodnota se vyčítá ze stupnice, která je znázorněná na senzoru. Tyto senzory fungují na principu objemové nebo délkové roztažnosti pevných látek, kapalin a plynů v závislosti na teplotě.

Nejpoužívanějším typem v domácnostech byl skleněný rtuťový teploměr, který se v současnosti již nesmí v Evropské Unii používat kvůli rtuti, která svými toxickými výpary ohrožuje lidské zdraví a zatěžuje i životní prostředí. Dnes se místo ní používá líh nebo galium.

Délkové roztažnosti materiálu se využívá u bimetalických teploměrů. Princip spočívá v ohybu senzoru při působení tepla. Senzor funguje díky rozdílu hodnot teplotní roztažnosti materiálu β :

$$\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2 \quad (4.7)$$

Přestože je pro získání vyšší citlivosti vhodné použít materiály s velkým rozdílem teplotních roztažností, je zde důraz na provozní rozsah teplot materiálu. Velmi používanou slitinou s nízkou teplotní roztažností je invar (Fe 64 %, Ni 36%). Materiály jsou ve formě pásu, které se podélně svaří k sobě. Tyto senzory se často používají jako bezpečnostní aktuátor nebo dvoupolohový přepínač v termostatu.

4.1.5 Optické senzory

Optické vláknové senzory (OVS) fungují díky nežádoucím vlivům na optické vlákno, kdy je signál skrze jeho parametry ovlivňovaný prostředím. V principu se tedy jedná o původní chybovou vlastnost vlákna. Vlákno se skládá z jádra s indexem lomu n_j a jeho obalu s indexem lomu n_p . Pro správnou funkčnost senzoru je nutné dbát, aby byla splněna podmínka:

$$\frac{n_p}{n_j} < 1 \quad (4.8)$$

Existuje mnoho různých variant jak za pomoci OVS lze měřit teplotu. Můžeme teplotu získat z amplitudové modulace, z fázové nebo polarizační modulace či spektrálním rozložením signálu. O dvou konkrétních optických senzorech je více v kapitolách 5.2 a 5.3.

4.2 Bezdotykové senzory

Bezdotykové snímání teploty je snímání teploty povrchu tělesa. Měří se elektromagnetické záření tělesa, které je v rozsahu vlnového záření od $2 \mu\text{m}$ do $25 \mu\text{m}$. Tomuto typu záření se též říká tepelné záření. Měření bezdotykově je výhodné pro neovlivňování činnosti měřeného objektu, možnost měření v bezpečné vzdálenosti nebo za provozu, kdy se těleso pohybuje či otáčí, má rychlou odezvu na změnu teploty a umožňuje měřit i větší rozsah, tedy teplotu na velké části povrchu. Ovšem objevuje se zde velká nejistota měření při neznalosti emisivity materiálu či prostupnost prostředí.

Pro detektory bezdotykového měření teplot se používá několik parametrů. Prvním je integrální citlivost $K [V \cdot W^{-1}]$ a rovnice pro tento parametr je podíl elektrického napětí U a zářivého toku Φ , který dopadá na citlivý povrch.

$$K = \frac{U}{\Phi} \quad (4.9)$$

Další dva parametry jsou spektrální $K_\lambda [V \cdot W^{-1}]$ a relativní spektrální citlivost S_λ , které popisují závislost citlivosti na vlnové délce. Parametr NEP je zkratka pro tzv. výkonový ekvivalent a udává zářivý tok, kdy výstupní signál U je roven efektivní hodnotě spektrální hustoty šumového napětí a je vyjádřen rovnicí:

$$NEP = \Phi \cdot \frac{\sqrt{\frac{U_s^2}{\Delta f}}}{U} \quad [W \cdot Hz^{-\frac{1}{2}}] \quad (4.10)$$

kde $\sqrt{U_s^2}$ je efektivní hodnota integrálního šumového napětí, a Δf je šířka frekvenčního pásma. Detektivita D je parametr definovaný jako opačná hodnota parametru NEP a posledním používaným parametrem je normovaná detektivita D^* , která je nezávislá na ploše záření S a rovnice je definována jako: [9]

$$D^* = D \cdot \sqrt{S} = \frac{\sqrt{S}}{NEP} \quad [W^{-1} \cdot m \cdot Hz^{1/2}] \quad (4.11)$$

Bezdotykové senzory se dělí na tři typy: Termoelektrické, bolometrické a pyroelektrické. Termoelektrické senzory fungují na principu ohřevu detekční citlivé kovové pásky. Pásky mají složení například BiSb-NiCr. Tento senzor dosahuje citlivosti $K = 110 V \cdot W^{-1}$. Bolometrické detektory fungují na principu odporových snímačů, kdy při ohřevu tepelným zářením se zvyšuje odpor materiálu a tím i napětí na něm při konstantním odporu. Pyrometry pracují díky pyroelektrickému jevu, tedy že spontánní polarizace P_s je závislá na změně teploty. Spontánní polarizace se dá popsat jako změna povrchového náboje krystalu daného materiálu, který patří do skupiny pyroelektrik, které tyto vlastnosti vykazují trvale. Nejpoužívanější materiál využívaný pro pyrometry je TGS neboli triglycin-sulfát. [9]

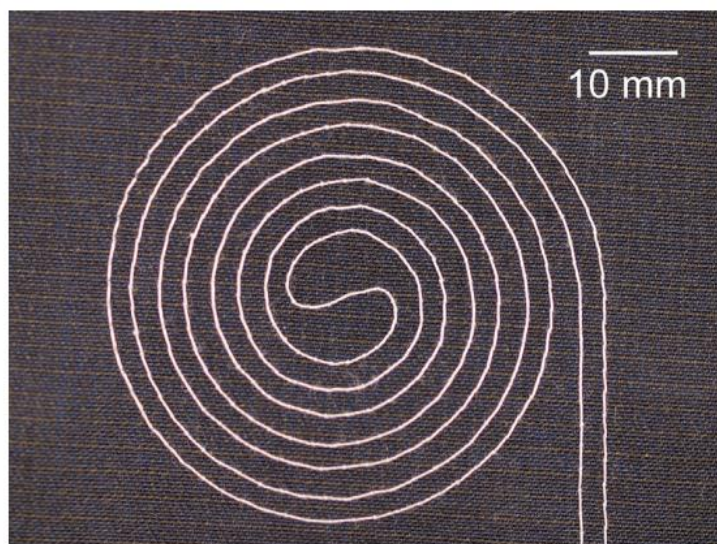
5 Distribuované senzory

Distribuované nebo jinak širokopásmové senzory jsou rozsáhlé senzory, jejichž citlivá část nebo celá část měří teplotu v cíleném prostoru. Princip distribuovaných senzorů je víceméně stejný jako u klasických dotykových senzorů teploty. Stejně je i jejich zapojení do obvodu či jakékoliv získávání teplotních dat.

5.1 „Odporový“ drát [10]

Na podobném principu jako komerční senzor Pt100 může pracovat i senzor s velkou citlivostní plochou. Tato plocha nemá za účel snímat více bodů a porovnávat jejich hodnoty např. v grafu, ale pracuje jako integrátor teplot měřených po celé citlivé ploše. Tato vlastnost je výhodná pro měření, kde záleží na teplotním určení celku, ale oblast je vystavena nerovnoměrnému teplotnímu zatížení. Při měření jednoho bodu je riziko, že oblast, kde se vyskytuje senzor, nebyla teplotně tak zatížena, jako jiné místo. Konkrétním příkladem je použití tohoto typu senzoru v pracovním ochranném obleku hasičů, kde je vhodné měřit teplotu na co největší ploše obleku.

Zde je velmi zásadní vlastností odolnost materiálu senzoru, který bude s vysokou pravděpodobností bez pouzdra. Drát je vsítý do textilu, proto je dobré použít velice ohebný materiál, což je vyžadováno také pro kompatibilitu s oděvem. Pro hasičský oblek se použil materiál nerezové austenitické oceli s přidáním chromu a niklu (AISI 304). Jeho zvětšené zobrazení a tvar, jak bude umístěn v obleku, je na obrázku 5.1:

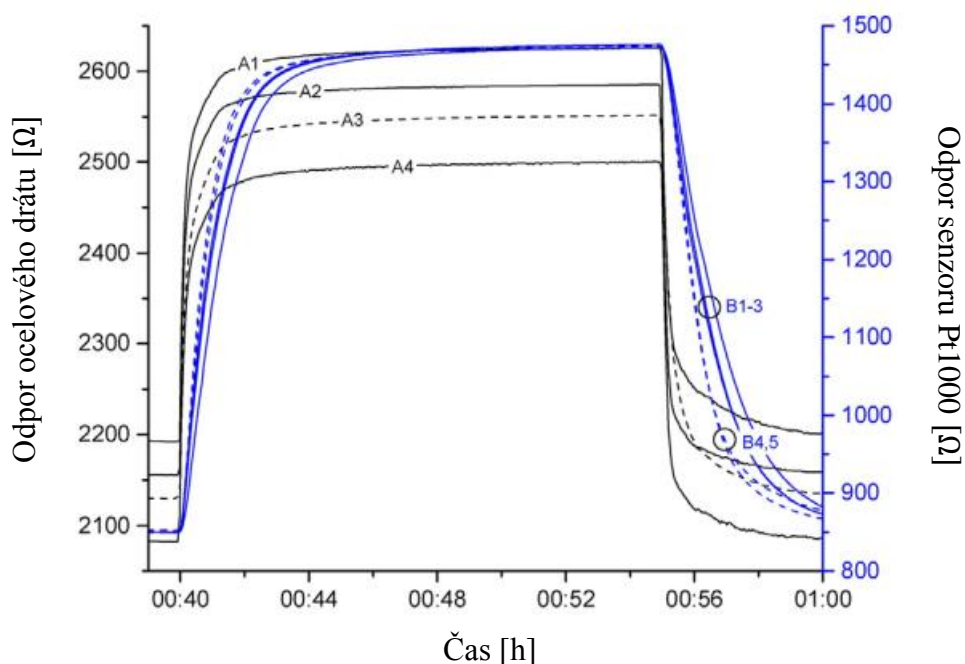


Obrázek 5.1: Tvar a velikost teplotního senzoru

Pro podobné využití by se dal využít odporový drát, ovšem zde by bylo dosaženo pouze dostatečného odporu pro snímání. Zde by bylo vhodné použít například odporový drát z niklu. Nikl je komerčně využíván v teplotních senzorech Ni1000 až Ni10000, kde se uplatňuje vysoká hodnota koeficientu α , velká linearita při zvyšování teploty a možnost měření vysokých teplot. Platinový drát je z hlediska teplotních vlastností nejvhodnější, je však velice drahý oproti výše zmíněným možnostem. Ovšem v tomto případě je ocelový austenitický drát naprosto dostačující variantou řešení.

Pro správnou funkčnost senzoru je potřeba tento senzor kalibrovat, kde se dá využít testovací laboratorní pece. U těchto zařízení je velikou výhodou konstantní ustálená teplota v celém prostoru, tedy kalibrace je i pro plošný senzor konstantní na celé délce.

Výhodou použití odolného materiálu, který není zapouzdřen či nijak elektricky oddělený od okolí je ta, že při teplotním skoku reaguje velice rychle, rychleji, než komerčně vyráběné senzory. To v praxi znamená obzvláště při nebezpečí, že senzory rychleji reagují na vysokou teplotu, tedy pro bezpečnostní zařízení jsou mnohem vhodnější. Rozdíl mezi komerčními senzory Pt1000 a odporovými ocelovými dráty je zobrazen na grafu 5.1, kde dochází k velkému zvýšení a následně snížení teploty okolí:



Graf 5.1: Závislost odporu Pt1000 a ocelového drátu na čase

5.2 Braggova optická mřížka

Braggova optická vláknová mřížka (v angličtině zkratka FBG – Fiber Bragg Grating) je modifikovaná struktura optického jádra podél centrální osy. Modifikuje se periodickými změnami indexu lomu v jádře tak, aby po modifikaci mřížka měla požadovanou strukturu, tedy alespoň přes tisíc period změn indexu lomu. Tomuto strukturovanému propouštění světla podle vlnové délky se říká Fresnelovy odrazy.

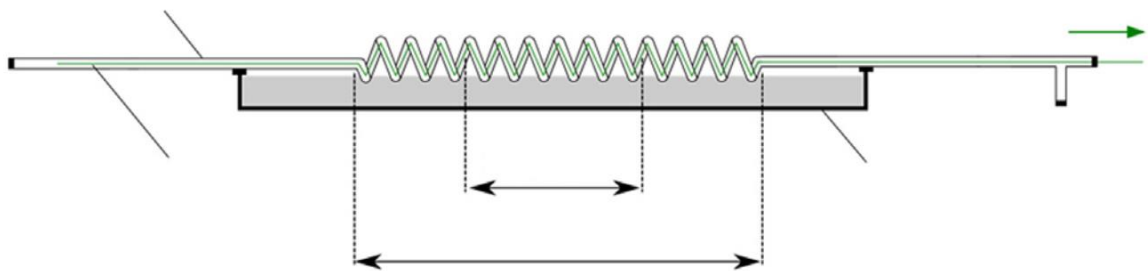
Dále také musí existovat velký rozsah, tedy rozdíl mezi minimální a maximální hodnotou. Funkčnost mřížky závisí na zvoleném zdroji světla, kde se mřížka vyrábí, a na přesnou vlnovou délku koherentního světla. [11]

Mřížka musí také splňovat tzv. Braggovu podmínku difrakce. Ta popisuje to, že perioda změn indexu lomu mřížky byla rovna polovině vlnové délky světla procházejícím vláknem. Díky tomu je vyšší účinnost odrazivosti světla na mřížce. To platí také pro celý násobek poloviny vlnové délky světla. Podmínka je také popsána v rovnici (5.1):

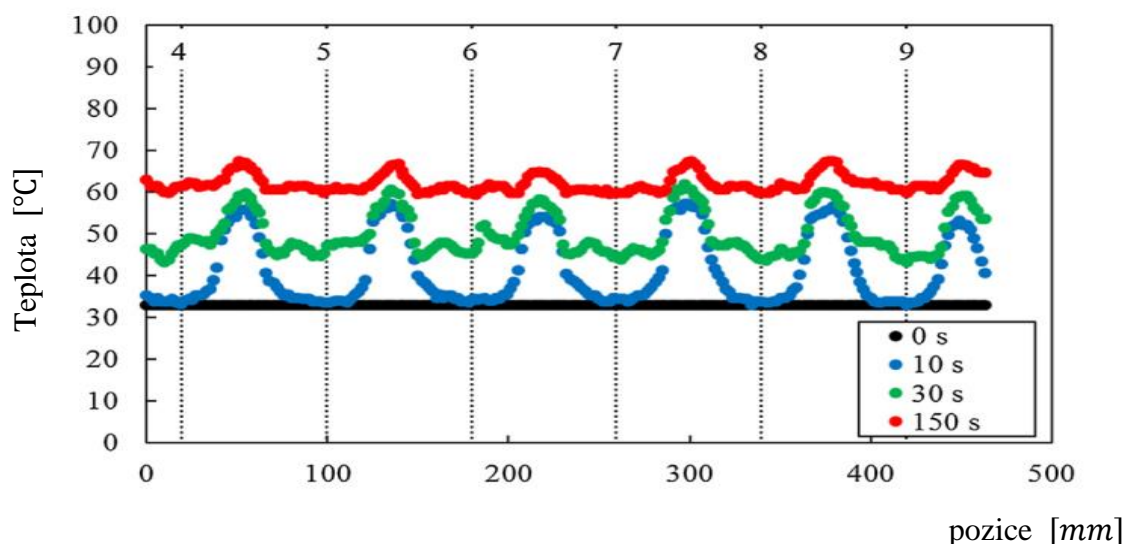
$$\Lambda_G = \frac{m_d \cdot \Lambda_0}{2N_{ef}} = \frac{c_v \cdot m_d}{f_0 2N_{ef}} \quad (5.1)$$

kde Λ_G je perioda mřížky ve vlákně a Λ_0 je perioda optické vlny, m je difrakční řád, c_v je rychlost světla, f_0 frekvence optické vlny a N_{ef} je efektivní index lomu pro šíření ve vlákně.

Experimentální data, kdy bylo měřeno nelineární prostředí [12], jsou zobrazena na obrázku 5.2 a grafu 5.2, které demonstrují použití několika desítek mřížek za sebou:



Obrázek 5.2: Schéma měření FBG senzorem



Graf 5.2: Teplotní data z FBG senzoru během při ohřevu

Distribučnou funkci tento senzor splňuje a to podle vlastního nastavení FBG. Mřížka může být i na velmi malém úseku i několikrát, ovšem když volíme mřížku na menší délce, tak není dosaženo velké citlivosti či rozsahu. Mřížka může být v libovolném množství řazena za sebe, tedy při čtení hodnot čteme všechny hodnoty zvlášť.

5.3 Distribuovaný optický senzor [13] [14]

Distribuovaný optický senzor nebo jinak distribuované teplotní snímání (DTS) je forma měření, kde snímáme teplotu po celém optickém vlákně. Oproti FBG je zde obrovský rozdíl v možnostech rozsahu měření, kdy FBG se využívá na centimetrových vzdálenostech, DTS může snímat data po délce až 30 kilometrů s rozlišením jedné hodnoty na jeden metr. Senzor má svůj zdroj a detektor na jednom konci drátu, jelikož zde budeme pracovat s odraženými impulsy.

Výhody tohoto měření jsou stejné jako u FBG tedy odolnost vůči vnějším vlivům elektromagnetického záření nebo nepříznivým prostředím. Dále snímání mnoha hodnot zároveň, minimální údržba nebo přesné určení polohy, kde došlo ke změně hodnoty.

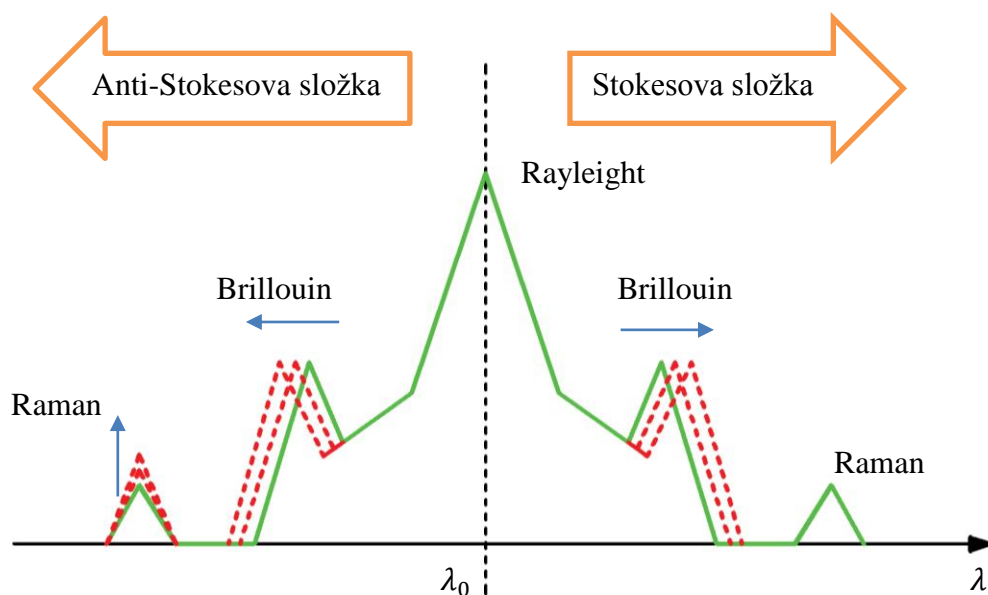
5.3.1 Zpětně rozptýlený signál

Princip DTS vyplývá ze znalosti zpětného rozptylu koherentního světla. To je způsobeno indexem lomu světla, tedy základní vlastností optického vlákna. Na obrázku 5.3 je vidět rozptylové spektrum světelného signálu. Dominantní složkou rozptylu je Rayleighova složka, která odpovídá svou vlnovou délkou původnímu světelnému signálu. Tato složka však nemá žádnou vypovídající hodnotu o změně teploty.

V blízkém okolí Rayleighova odrazu je Brillouinova složka. Ta je sice přesnější a stabilnější než Ramanova složka, o které je psáno níže, ale je velice problematická pro měření kvůli blízkosti dominantní složky, tedy je velice obtížně filtrovatelná.

Nejslabší rozptylovou složkou je Ramanova složka. Ta podobně jako Brillouin má dvě vlnové délky stejně vzdálené od Rayleighovy složky. Na rozdíl od něj však je více vzdálená od centrální složky, což umožňuje přesnou filtraci nejsilnějších složek zpětného rozptylu.

Obě části Ramanova signálu mají své pojmenování a jasné vlastnosti. První složka se nazývá Stokesova. Tato hodnota má vždy vyšší vlnovou délku než původní zdroj a velikost její amplitudy je téměř nezávislá na teplotě. Protipólem Stokesovy složky je Anti-Stokesova složka. Ta má nižší vlnovou délku než světelný zdroj a je citlivá na malé změny teploty. Tedy systém měření vychází ze zpracování poměru Stokesovy a Anti-Stokesovy složky.



Obrázek 5.3: Rozptylové spektrum světelného signálu při odrazu

5.3.2 Optická reflektometrie v časové / frekvenční oblasti

Optical Time Domain Reflectometry (OTDR) nebo Optical Frequency Domain Reflectometry (OFDR) jsou metody získávání dat z DTS. Jedná se o soustavu, která je jak zdrojem koherentního světelného signálu, tak jeho přijímačem a následně zpracovává naměřená data a převádí je na elektrické hodnoty. Obě metody se již podle názvu liší parametrem, který se používá na určení místa, kde dochází ke změnám na optickém vlákně. OTDR pracuje obzvláště s Rayleighovým rozptylem a Fresnelovým odrazem, což je odraz od různých spojů optických kabelů. Tato metoda se dá použít

pouze na velké vzdálenosti kvůli vysokým požadavkům na optoelektronické součástky, které by musely disponovat rychlou časovou odezvou. Celkové rozlišení se určuje pomocí rychlostní rovnice kinematiky. V tomto případě tato základní rovnice bude v tomto tvaru:

$$L = \frac{v \cdot t}{2} \quad (5.2)$$

kde L je délkový rozsah jedné měřené oblasti, v je rychlost fotonu a t je čas, po jakou dobu se vysílá světelný impuls do vlákna. Pokud tedy chceme měřit s rozlišením jednoho metru, je zapotřebí, aby soustava zvládala vysílat signál po dobu přibližně 7 ns , což v dnešní době je běžně uskutečnitelné.

OFDR naproti tomu vysílá pravidelné optické impulsy s určitou frekvencí. To tedy znamená, že signál ze zdroje se setkává se signálem do detektoru.

6 Návrh senzoru pro měření střední teploty

Základem této práce bylo vybrat nejvhodnější způsob měření střední teploty proudícího vzduchu v libovolně širokém kanále. Metoda, která byla zvolena, je metoda odporového drátu, kdy je použitý jeden drát, jehož elektrický odpor je závislý na teplotě. Tento návrh i s mechanickým připojením k elektronice tvoří mechanickou část celého senzoru.

V elektrické části bude navržena a vyrobena deska plošných spojů (DPS) s potřebnými komponenty. Pomocí této desky bude zprostředkován výpis naměřených hodnot jak na samotném zařízení, tak mohou být vypisovány v počítači pomocí USB sběrnice a softwarové aplikace. Elektronická část bude také naprogramována tak, aby se dala následně uživatelem nastavit na potřebné měřicí parametry.

Součástí celého návrhu je také softwarová aplikace, která bude navržena v programu Matlab a následně zkompileována do souboru .exe.

6.1 Požadavky na mechanickou část

Pro vytvoření vhodného čidla nebo skupiny čidel teploty bylo potřeba zvážit možnosti, kterými se dosáhne výsledku, tedy měření střední teploty v kanále. Pro vhodný návrh se vycházelo z již existujících čidel, tedy největší důraz byl kladen na principy komerčních senzorů. Z již popsanych senzorů se dá použít princip odporového snímání teploty nebo využít optického vlákna. V tomto případě se využívá odporové snímání obzvláště z toho důvodu, že optické vlákno vyžaduje složitou elektroniku, ovšem odporové snímání závisí pouze na tvrdém proudovém zdroji a na přesném měření napětí.

Výhodou snímání odporového drátu může být nepřeberné množství možností, jak propojit drát s měřicí elektronikou. Kvůli vodivosti drátu se tak dá učinit téměř v jakémkoliv námi zvoleném místě. Omezení ovšem nastává v situaci, kdy je potřeba senzor zkalibrovat, aby měřená teplota byla co nejpřesnější, tedy pro přesnější měření bude stanoveno několik měřících pozic, které mají jak pevně daný měřicí rozsah, tak vlastní elektrický odpor.

6.1.1 Přehled možných materiálů

Při volbě materiálu byly podstatné 4 faktory, které musely být splněny pro vhodné využití jako čidlo teploty: elektrická vodivost nízká, velký teplotní součinitel odporu, technologické možnosti a v neposlední řadě i cena materiálu.

Elektrická vodivost materiálu σ je opačná hodnota měrného elektrického odporu materiálu ρ_e podle rovnice (6.1):

$$1 = \frac{1}{\delta} \quad (6.1)$$

Součinitel elektrického odporu je vlastnost, díky které jsme schopni měřit změny vlastností, tedy teplotu. Odpor drátu se vypočítá z rovnice (6.2), kde L je délka vodiče, S je průřez vodiče a ρ_e je měrný elektrický odpor materiálu.

$$R = \frac{L \cdot \rho_e}{S} \quad (6.2)$$

Konkrétně se tedy posuzuje obzvláště měrný elektrický odpor materiálu, který je pro zadané složení a referenční teplotu jasně daný.

Teplotní součinitel odporu je velice specifický a klíčový prvek pro využití materiálu jako teplotní čidlo. Celková funkčnost a základní určování teploty vychází ze zjednodušeného vzorce pro výpočet závislosti odporu na teplotě (4.2). Tato rovnice pro konkrétní zadání bude vyhovovat, jelikož se nebudou měřit teploty nad 200 °C. Tento parametr je u všech uvažovaných materiálů použitelný a byl také u všech materiálů hlavním důvodem jejich zvažování.

Velice kritickým parametrem pro volbu materiálu byla cena materiálu a jeho výrobní možnosti a dostupnost. Cenově nejkritičtějším materiálem je platina, která se pohybuje v řádu tisíců Kč za jeden metr tenkého drátu, což je pro toto využití příliš drahé. Platinové senzory se sice vyrábí a prodávají za přijatelné ceny, ovšem dostupné technologické zázemí pro výrobu je v tomto případě nedostatečné.

Podle rovnice (6.2) je pro dosažení vysoké hodnoty odporu vhodné použít vodič s minimálním průřezem i s ohledem na potřebnou délku vodiče, tedy aby pro dosažení měřitelné hodnoty nebylo potřeba příliš mnoho materiálu. Tento požadavek se stal rozhodujícím obzvláště kvůli nedostupnosti požadovaného průměru vodiče a také kvůli obtížné manipulaci s ním. Vodič by byl velice náchylný ke zničení přetržením, tedy při samotném zpracování.

Tabulka 6.1: Vlastnosti vybraných materiálů

Materiál	Elektrická vodivost γ [1/Ωm]	Teplotní součinitel odporu α [1/°C]	Průměr [mm]	Cena/m [Kč]
Nerezová ocel	10^6	$1.04 \cdot 10^{-3}$	0.05	7
Platina	$9.43 \cdot 10^6$	$3.93 \cdot 10^{-3}$	0.1	11500
Měď	$5.95 \cdot 10^7$	$4.29 \cdot 10^{-3}$	$1.8 \cdot 10^{-3}$	10
Mosaz	$1.41 \cdot 10^7$	$1.5 \cdot 10^{-3}$	0.1	1.6
Nikl	$1.46 \cdot 10^7$	$6.41 \cdot 10^{-3}$	0.025	75
NiChrom	$0.7 - 1 \cdot 10^5$	$0.4 \cdot 10^{-3}$	0.1	5.9

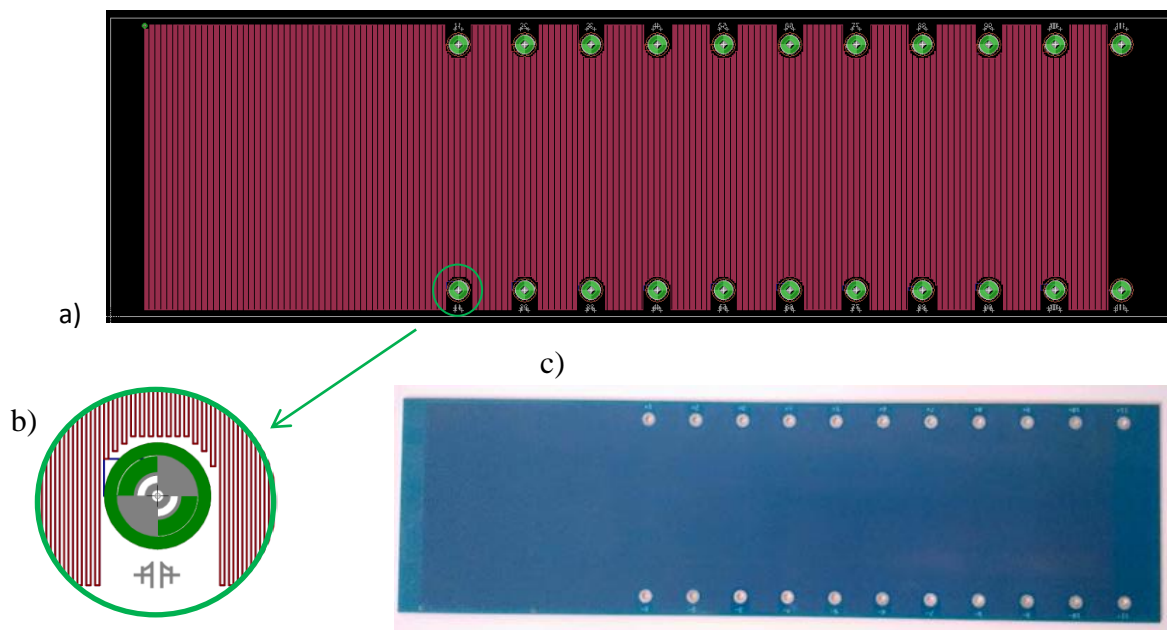
Podle tabulky 4.1 se nejvíce hodí nerezová ocel i díky nižší vodivosti oproti ostatním kovům, ovšem z technologických důvodů byla vybrána měď. Hlavním důvodem pro tuto volbu bylo, že se dá vyrobit jako DPS, kde se dosahuje velice malého průřezu materiálu výrobní technologií, konkrétně leptáním. Navíc se deska vyrábí i s maskou, která chrání měď před oxidací a vnějšími vlivy. Pro desku je pouze potřeba zvolit vhodné připojení k elektronice.

6.1.2 Návrh a výroba čidla

DPS je navržena v programu EAGLE (ver.7.1.0). Průřez vodiče po celé délce bude nastaven na 0.0018 mm^2 , což odpovídá technologickému maximu, které je stanoveno výrobcem, kterým je v tomto případě firma Gatema a.s. Vodič je rozložen na obou stranách desky. Pro zjištění vhodné délky byly vlastnosti mědi, průřez vodiče a přibližný požadovaný odpor 200Ω dosazeny do upravené rovnice (6.2). Hodnota měrného elektrického odporu mědi je $1.724 \cdot 10^{-8}$. [15]

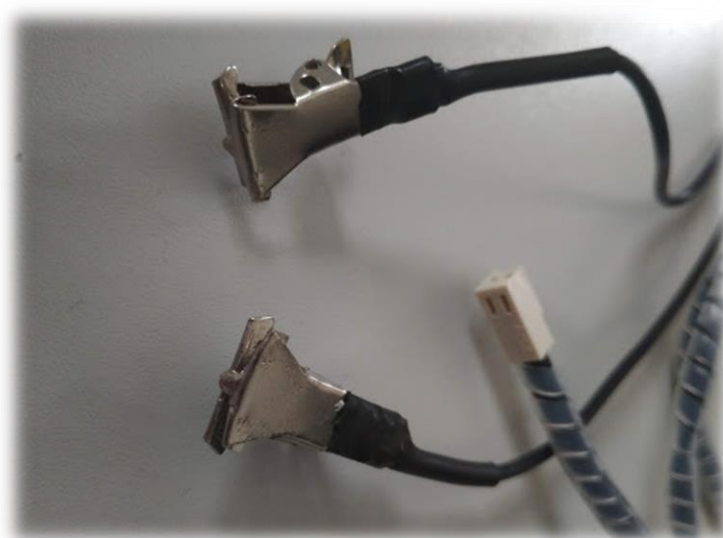
$$L = \frac{R \cdot S}{\rho_e} = \frac{200 \cdot 1.8 \cdot 10^{-9}}{17.24 \cdot 10^{-9}} \doteq 20.9 \text{ m}$$

Hlavní požadavky na technologii výroby DPS jsou vždy určeny výrobcem. Technologické požadavky na vzdálenost mezi jednotlivými vodiči na DPS jsou alespoň 150 mm . Vodič bude na DPS vyleptán meandrovým stylem.



Obrázek 6.1: Senzor teploty: a) návrh v EAGLE b) detail c) reálný senzor

Jako minimální rozměr kanálu, který bude tímto senzorem měřen, byla stanovena hodnota 90 mm. Pro tyto rozměry byla vytvořena meandrová struktura s délkou hrany 90 mm. Přibližný odhad odporu, který bude na tomto úseku byl 300 Ω . Hodnota je tedy dostatečná, ovšem šířka celého čidla je vyšší, aby tím bylo zabráněno případným nedokonalostem při výrobě nebo křehkosti celého čidla. Celý senzor byl tedy navržen jako oboustranná DPS s možností měření celkem na jedenácti různých rozměrech v rozsahu od 90 do 290 mm po 20 mm intervalech. Senzor byl pokryt maskou z chemického cínu a díry pro konektor byly prokoveny a pozlaceny.



Obrázek 6.2: mechanický konektor mezi senzorem a elektronickým zařízením

Mechanické propojení s elektronickou částí bylo vyrobeno z jednoduché hliníkové mechanické svorky s pružinou, které slouží pro jednoduché připojení k čidlu a pro snadnou volbu rozsahu čidla.

6.1.3 Testování požadovaných vlastností

Jeden z hlavních požadavků na senzor byla jeho linearita v požadovaném rozsahu a testování výdrže materiálu. Pro ověření těchto teoretických vlastností senzoru bylo provedeno experimentální měření. Pro testování čidla byly použity 2 typy plastových ventilačních kanálů o různém průměru. První kanál s kruhovým průměrem 150 mm a druhý kanál z obdélníkovým profilem, který měl délku delší hrany 200 mm. Jako zdroj vzduchového proudění a také ohřevu vzduchu byla použita horkovzdušná pistole DeWALT, která je schopna generovat 450 °C na vnitřní ohřevné spirále. Rozlišení horkovzdušné pistole je 10°C. Pistole byla umístěna na jeden konec kanálu, kde bylo zamezeno zpětnému proudění zúžením připo pro přiváděný vzduch z pistole. Do

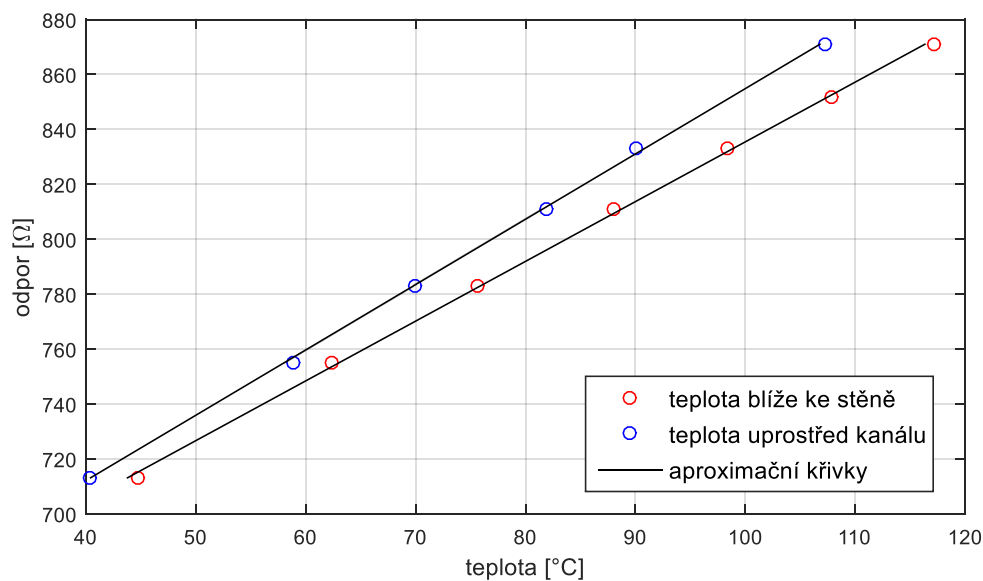
metrového kanálu byl v polovině jeho délky vyřezán otvor pro vložení čidla teploty. Celá tato měřicí soustava je ukázána na obrázku 6.3:



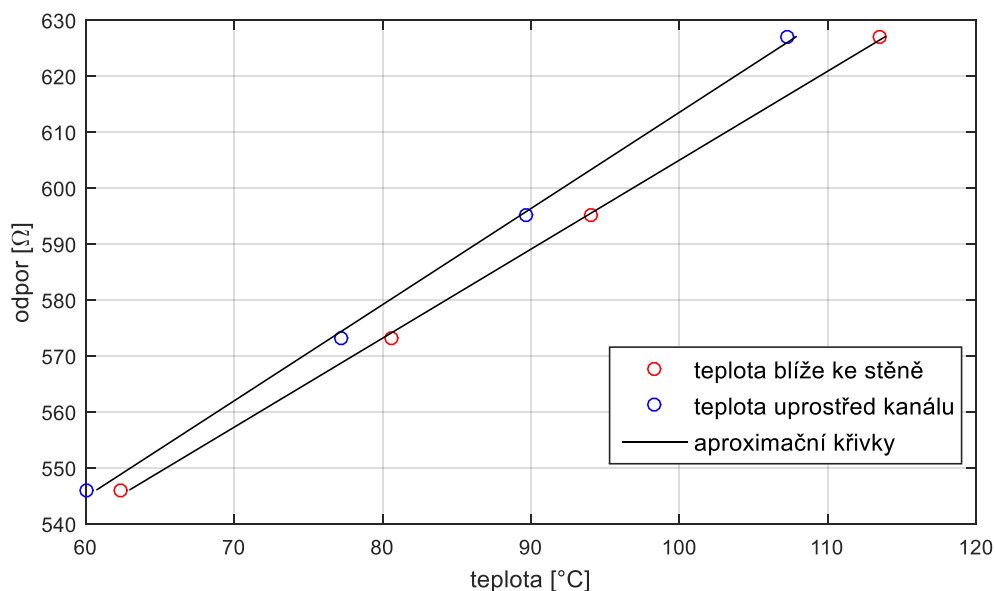
Obrázek 6.3: Sestava pro testování teplotního čidla

K měření teploty se využíval termočlánek typu K, který je součástí infračerveného teploměru Voltcraft IR 1200–50D, jehož přesnost je 1.5%, a termočlánek typu K připojený k multikanálovému měřiči HT100, jehož přesnost je 1%. Měření odporu čidla bylo prováděno multimetrem Fluke 175 se základní přesností 0.1%. Účelem měření nebylo zjistit dynamické změny čidla, ani zkoumat teplotní profil v kanálu, ovšem pouze zkoumat děje při ustálené teplotě proudícího vzduchu. Jednotlivá měření probíhala v 10-ti minutových intervalech. Výsledky měření jsou vyobrazeny na grafu 6.1 a grafu 6.2.

Z grafů, kde byly hodnoty pro senzor a dvě měřené teploty dány do závislosti, byla provedena aproximace lineární křivkou. Lze vidět, že závislost je lineární, z čehož vyplývá, že naměřené hodnoty není potřeba složitě aproximovat.



Graf 6.1: Charakteristika závislosti odporu na teplotě pro rozměr 200mm



Graf 6.2: Charakteristika závislosti odporu na teplotě pro rozměr 150mm

Mimo vykreslené výsledky je třeba doplnit, že senzor vydržel teplotní zátěž s amplitudou 117.2 °C. První vlastnost již tedy byla potvrzena při samotném měření. Celkově lze tedy říci, že senzor splňuje v dostatečné míře požadavky, které jsou na něj kladeny.

6.2 Návrh elektroniky

Pro navržený senzor a jeho vhodné nastavení je třeba vyrobit vhodnou řídicí elektroniku, která bude splňovat následující požadavky:

- Proudový zdroj, který dodává maximálně 1 mA do teplotního čidla
- Komunikace skrze USB sběrnici s počítačem
- Napájení přes USB
- Vestavěný akumulátor
- Nastavení zařízení skrze jednoduché ovládání
- Zesílení napěťového signálu ze senzoru

Jako základ celého zařízení byl vybrán mikrokontrolér dsPIC33FJ128MC804 od společnosti Microchip Technology Inc. Tento mikrokontrolér byl zvolen na základě nabytí znalostí o něm během studia. Jedná se o 16-ti bitový signálový procesor s velkým množstvím periférií a dobrým výpočetním výkonem. Čip má 44 pinů, z čehož jsou některé piny napájecí. Je zde možnost využít maximálně 26 digitálních nebo 9 analogových pinů, což pro navrhované zařízení je dostačující.

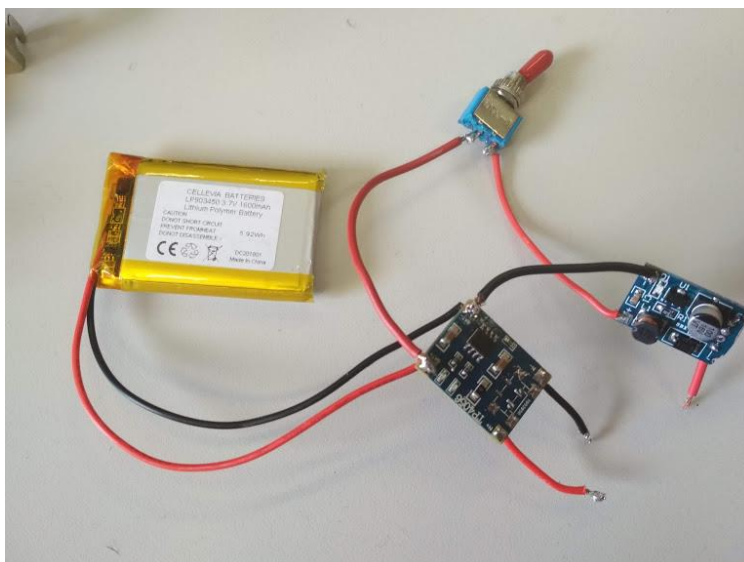
6.2.1 Napájení zařízení

Pro napájení zařízení byly zvoleny dva principy. Jako hlavní princip je napájení skrze USB mini konektor, který je připojený k 5V transformátoru pro mobilní zařízení nebo připojen do USB portu v počítači. Tento způsob napájení byl zvolen především kvůli využitelnosti komunikace mezi zařízením a počítačem.

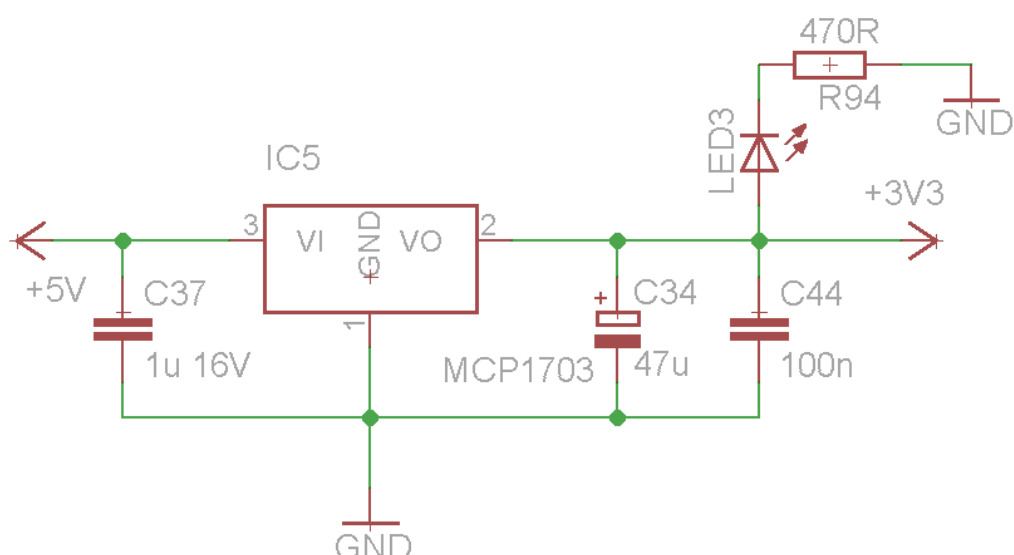
Komunikace s počítačem je zprostředkována přes čip FT231XS od společnosti FTDI, který dovoluje oboustrannou komunikaci s mikročipem skrze UART sběrnici.

Jako druhý princip napájení byl zvolen akumulátor Li-pol. Akumulátor má své vlastní implementované ochrany a je napájen přes USB mini konektor přes přídavný napájecí modul pro Li-pol akumulátory s čipem TP4056. Napájení je zprostředkováno kvůli požadavku na vstupní napájení 5 V přes další přídavný zvyšující měnič s čipem CE8301. Poslední ochrana, kterou tento napájecí systém obsahuje, je mechanický přepínač, díky němuž se zabráňuje poškození napájecích modulů a akumulátoru při napájení zařízení pomocí USB. Celý systém je zobrazen na obrázku 6.4.

Mikrokontrolér je napájen napětím 3.3 V, proto je potřeba implementovat do zařízení snižující měnič stejnosměrného napětí na stejnosměrné napětí. Pro tyto účely byl použit integrovaný obvod MCP1703. Schéma jeho zapojení je na obrázku 6.5. Napětí 3.3 V je připojeno ke všem ovládacím prvkům zařízení a diodám. Prvky pro zpracování signálu ze senzoru jsou napájeny napětím 5 V.



Obrázek 6.4: Systém napájení z akumulátoru

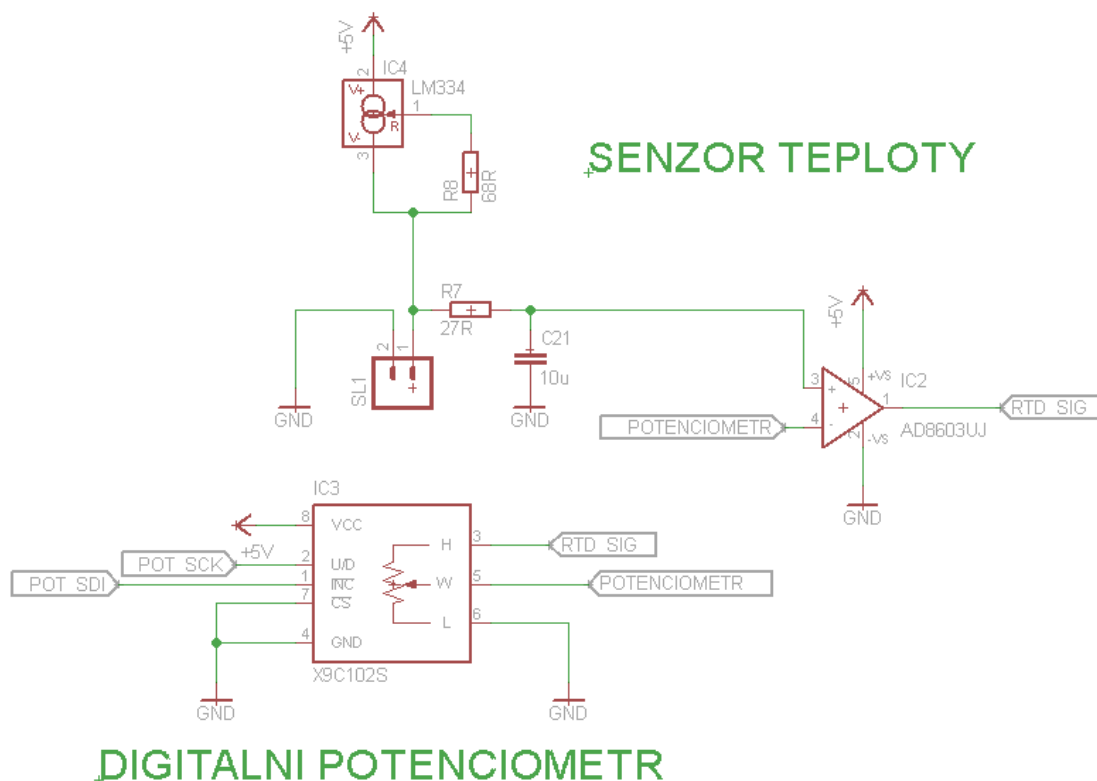


Obrázek 6.5: Schéma zapojení snižujícího měniče

6.2.2 Zpracování signálu z teplotního čidla

Jako základ zpracování signálu z teplotního čidla je nutné převádět analogový signál na digitální signál. To se provádí pomocí 12-ti bitového AD převodníku, který je obsažen v mikrokontroléru jako jedna z periférií. Pro senzor použijeme obvod podle Obrázek 4.2. Pro toto zapojení je vyžadován proudový zdroj, který generuje proud do 1 mA . Jako proudový zdroj byl zvolen Integrovaný obvod LM334, který je schopen generovat konstantní proud od $20\text{ }\mu\text{A}$ do 2 mA , čímž je možné omezit ohřev senzoru proudem podle (4.5). To by vytvářelo odchylku v měření a senzor by nebyl dostatečně přesný. Signál je dále filtrován přes RC-filtr proti vysokofrekvenčnímu napěťovému šumu.

Kvůli nižším hodnotám napětí, které vychází z malého proudu, je signál zesilovaný pomocí operačního zesilovače v režimu neinvertujícího zesilovače. Pro nastavitelnost zesílení je místo napěťového děliče použit digitální potenciometr, který se nastavuje pomocí mikrokontroléru. Zesílený signál je před vstupem do mikrokontroléru opět filtrován RC-filtrem.



Obrázek 6.6: Schéma snímání a zesilování signálu

6.2.3 Ovládání zařízení

Ovládání celého zařízení je zprostředkováno několika tlačítky a především displejem. Typ displeje byl zvolen RX1602A3-BIW-TS. Tento displej komunikuje s mikrokontrolérem přes I²C sběrnici. Displej má vlastní mikrokontrolér, který zpracovává data z řídicího mikrokontroléru a nastavuje jednotlivá pole z vlastní knihovny. Displej dokáže zobrazit celkem 32 znaků ve 2 řádcích, což je pro jednoduché zařízení dostatečné.

Tlačítka jsou spínací, tedy při sepnutí dostáváme na výstupu logickou jedničku. Pro celkový restart zařízení je zde umístěno i resetovací tlačítko, které uvede systém do vstupního stavu a vymaže nastavení, které bylo provedeno uživatelem. Na zařízení jsou tlačítka označena jako *Esc*, *Enter*, *minus* a *plus*. Tlačítko pro spuštění celého programu

znovu bylo pojmenováno *Reset*. Způsob ovládání je dále popsán v návodu pro použití, který je k dispozici v přílohách.

6.2.4 Firmware

Podstatnou část návrhu elektronické části je vlastní program pro mikrokontrolér. Tento program byl vytvořen v prostředí Matlab - Simulink s využitím knihovny MPLAB. Simulink umožňuje po vytvoření programu kompilaci do jazyka C, který se následně nahrává přes programátor do samotného mikrokontroléru. Byl použit programátor PICkit 4. Pro část kódu, který nastavoval komunikaci s displejem, byl použit i program MPLAB X IDE. Tento kód používá knihovnu myI2C, která byla vytvořena v Mechlabu (viz. přílohy). Celý program je taktéž v přílohách.

Program je rozdělen na několik úseků. První úsek je inicializace celého firmwaru. Firmware využívá k programování knihovnu *MPLAB Device Blocks for Simulink*. Tato knihovna kompiluje schéma ze simulinku přímo do C kódu. Vstupní nastavení programu je pomocí bloku *Microchip Master*. Zde je nastaveno taktování mikrokontroléru na 80MHz (40 MIPS), což je maximální hodnota pro používaný mikrokontrolér, dále je zde určen programátor a blok *Simulink reset*.

Další úsek je snímání dat z tlačítek. Tlačítka kvůli zakmitání jejich signálu vyžadují debouncing. Toto ošetření je potřebné pro zpřesnění signálu, abychom dostali přesně jeden impuls při stisknutí. Debouncing byl proveden pomocí jednoduchého State-space model v Simulinku. Následně se tato data upravují a využívají jako řídicí prvky programu. Digitální potenciometr se nastavuje pomocí 3 pinů, z nichž pro tuto aplikaci stačí pouze 2, kdy 3. pin je pouze spuštění integrovaného obvodu. 2 piny se používají jako určení směru posunu a jeho provedení. Pomocí postupného posouvání jezdce lze jednoduše nastavit vhodné zesílení operačního zesilovače. Digitální potenciometr má celkově 100 poloh, tedy vytváří 100 různých poměrů.

Pro vhodné naprogramování bylo potřeba provést kalibrační měření, kdy za daných teplotních podmínek byla uložena napěťová hodnota, která se poté i vhodně zesílí přes neinvertující zesilovač. Celá kalibrace a testování bude více popsána v kapitole 6.4. Při stanovení těchto parametrů je potřeba také zpracovat analogový signál. Signál je převeden na 12bitové digitální číslo, kdy číslo decimální bitové číslo 4095 vyjadřuje analogovou hodnotu napětí 3.3 V tedy napájecí napěťovou hladinu mikrokontroléru. Výsledné číslo je vloženo do rovnice (4.2), která je upravena na tvar (6.3), kdy neznámá hodnota je aktuální teplota na teplotním čidle. V rovnici pomocí Ohmova zákona můžeme při konstantním proudu nahradit odpor napětím.

$$\frac{U}{I} = \frac{U_0}{I} \cdot [1 + \alpha \cdot (T - T_0)] \quad (6.3)$$

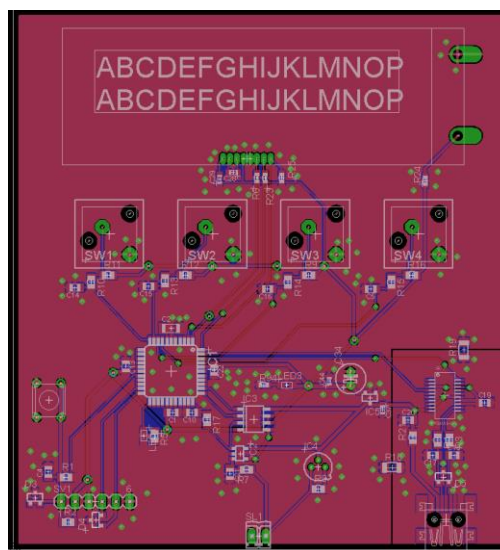
Hodnota je pomocí I²C sběrnice vypisována na displej. Pro vypisování poslední naměřené hodnoty v rámci zvoleného času byly naprogramovány hodiny, které pracují se zpožděním 0.5 s/min. Tato odchylka by se softwarově mohla kompenzovat, ovšem zpoždění není pro účely vyčítání poslední hodnoty důležité.

Další funkcí, která byla implementována, je kontrola napětí na akumulátoru. Při jejím poklesu pod referenční napětí 3.1 V se na pinu objeví digitální jednička a zařízení přestane pracovat a vyžaduje připojení USB konektoru pro nabíjení.

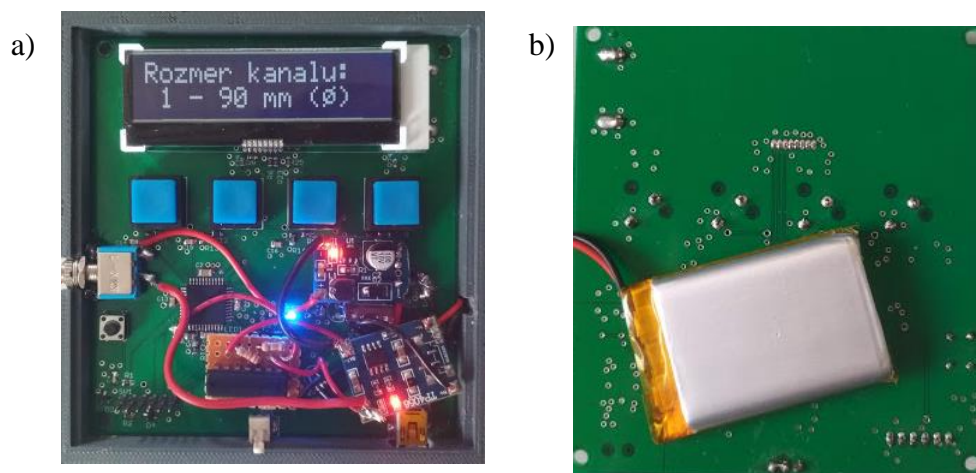
Poslední Programovací strukturu zahrnuje sériová komunikace přes sběrnici UART s počítačem. Tento signál je nastaven blokem *UART Configuration*, kde je nastaven především Baudrate, což je přenosová rychlost bitů za sekundu.

6.2.5 Finální výsledek

Samotný senzor byl tedy navržen v programu EAGLE (obrázek 6.7). Výsledek je ukázán na obrázcích 6.8 a 6.9. Celá deska byla osazena potřebnými součástkami, které byly v programu taktéž navrženy, ale osazení DPS nebylo součástí její výroby. Výsledná deska byla poté doplněna o napájecí strukturu popsanou v kapitole 6.2.1. Vše bylo vloženo do pouzdra vyrobeného na 3D tiskárně. Pro zvýraznění LED světél byly do pouzdra připevněny světlovody. Následný výrobek byl zpevněn z bočních stran vruty a ošitkován pro jasné rozpoznání funkcí tlačítek.



Obrázek 6.7: Návrh DPS v programu EAGLE



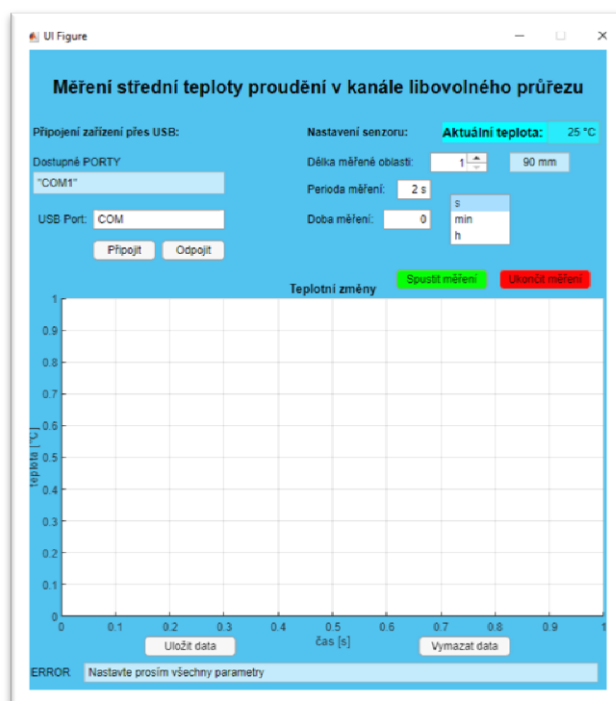
Obrázek 6.8: Vnitřní struktura zařízení a) zepředu b) zezadu



Obrázek 6.9: Výsledné elektronické zařízení

6.3 Aplikace v Matlabu

Pro vyčítání dat k dalšímu zpracování či lepšímu přehledu v časovém úseku byla vytvořena aplikace, ve které se dá senzor nastavit podobně jako přímo na zařízení. Data jsou získávána prostřednictvím USB konektoru a sběrnice UART. Úvodní rozhraní (obrázek 6.10) dává možnost libovolně připojit zařízení pro komunikaci, dále je možné nastavit, na jakém rozsahu čidla se bude měřit a volba doby měření s vlastním krokem. Princip nastavení správné hodnoty je pouze v tom, že samotný program pouze vysílá signál, který zařízení zpracuje a podle něj se nastaví. Program slouží jako druhotný ovladač s vykreslováním dat. Naměřená data je možné po naměření uložit do textového souboru a dále s nimi pracovat. Aplikace k instalaci s návodem pro použití jsou k dispozici v přílohách.



Obrázek 6.10: Vzhled Matlab aplikace pro výčet dat ze zařízení

6.4 Kalibrace a testování zařízení

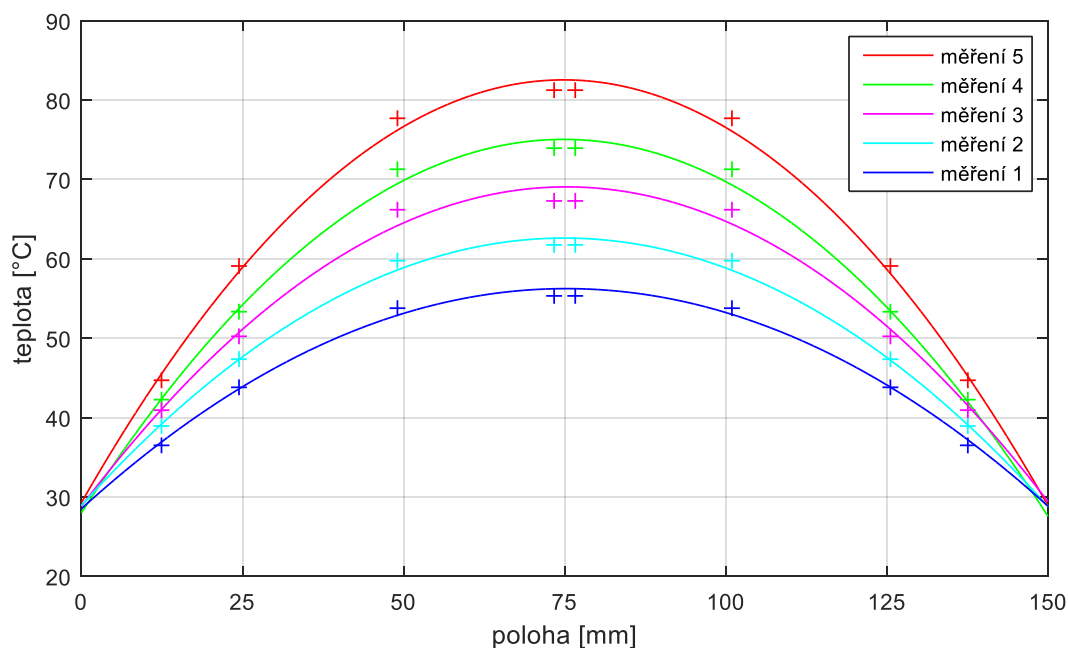
Kalibrace probíhala při konstantních teplotních podmínkách, kdy tato podmínka byla kontrolována termočlánkem typu K přes multikanálový dělič HT100, který byl použit při testování vlastností (kapitola 6.1.3). Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 6.2. Hodnoty v řádku „U – zesílení“ jsou hodnoty, kde je již nastavena výstupní hodnota ze zesilovače, tedy tato hodnota bude sloužit jako referenční teplota pro vhodné naprogramování. Hodnoty byly snímány jako napěťový nezesílený signál přes navržené elektronické zařízení a tudíž zahrnují i případné odchylky, čímž je myšlen například RC-filtr umístěný na nezesíleném signálu z čidla teploty.

Tabulka 6.2: Kalibrace zařízení

Pozice	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Teplota [°C]	25.2	25.2	25.2	25.2	25.2	25.2	25.1	25.1	25.1	25.2	25.1
Napětí [V]	0.265	0.316	0.367	0.414	0.461	0.507	0.551	0.595	0.639	0.686	0.726
U – zesílení [V]	2.076	2.141	2.184	2.098	2.121	2.138	2.145	2.147	2.152	2.147	2.203

Testování funkčnosti celého zařízení pro měření střední teploty v kanále s proudícím vzduchem bylo podrobena testování podobnému při určení základních požadovaných vlastností a kalibrace. Nyní bylo potřeba na naměřených datech ze zařízení určit, zda opravdu získává střední teplotu proudícího vzduchu. Pro měření bude opět použito elektronické zařízení a pro větší přesnost bude vyčítán odpor senzoru jako

napětí, jelikož teplotní hodnota je zaokrouhlována kvůli jejím nerovnoměrným teplotním skokům, které jsou způsobeny AD převodníkem. Teplotní profil, který je potřeba určit, bude měřen pomocí čtyř termočlánků typu K, které budou co nejpřesněji rozmístěny po teplotním čidle a pevně přichyceny. Tyto termočlánky jsou připojeny k zařízení HH520 od společnosti Omega Engineering. Nastavení elektronického zařízení pro měření střední teploty je, jak již bylo zmíněno, nastavené na výčet napětí. Konkrétně bylo potřeba nastavit teplotní čidlo na čtvrtou úroveň, tedy na průměr 150 mm. Zesílení signálu bylo nastaveno na 4.5, jelikož napěťový signál byl slabý (pouze 419mV při teplotě 25°C). Naměřená data jsou uvedena v grafu 6.3 a tabulce 6.3.



Graf 6.3: Naměřená a aproximovaná data – teplotní profily

Tabulka 6.3: Naměřené a vypočítané hodnoty během testování zařízení

Měření	T_1 [°C]	T_2 [°C]	T_3 [°C]	T_4 [°C]	$T_{stř}$ [°C]	$U_{čidlo}$ [V]	$T_{čidlo}$ [°C]
1	25,7	25,5	25,6	25,6	25,6	1,888	25,6
2	36,6	43,8	53,8	55,3	47,1	2,035	45,4
3	38,9	47,4	59,7	61,7	51,4	2,072	50,4
4	40,9	50,3	66,1	67,4	55,8	2,102	54,5
5	42,3	53,3	71,2	73,9	59,3	2,135	58,9
6	44,8	59,0	77,7	81,2	64,7	2,178	64,7

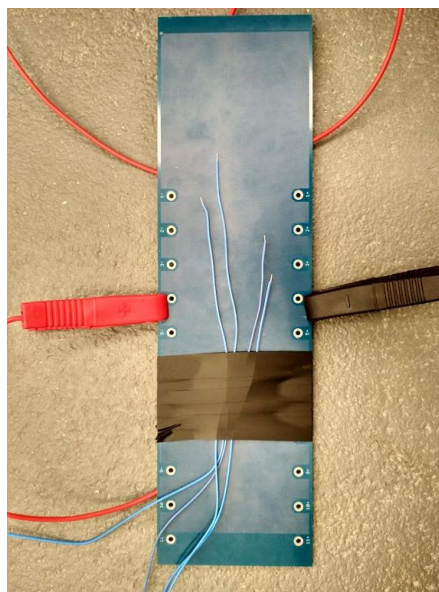
V tabulce 6.3 jsou nejprve uvedeny konkrétní teploty naměřené jednotlivými termočlánky. Dále pak bylo nutné odhadnout na základě těchto teplot a jejich umístění teplotní profil v kanále. Proudění v kanále bylo považováno v jeho průřezu za centrálně nehomogenní, tedy naměřené teploty byly použity dvakrát, kdy zrcadlově umístěné termočlánky by naměřily stejná data. Tato data byla aproximována polynomem 2. řádu, čímž bylo dosaženo přibližného odhadu teplotního profilu. Z aproximačních dat byly vyjádřeny střední teploty, které budou sloužit jako porovnání dat z navrhovaného zařízení.

Pro ověření výsledků nebylo použito referenční teploty, ale byla použita vlastní referenční hladina pro vyloučení nevhodného nastavení zesílení. Za tuto hladinu je považován celý první řádek v tabulce 6.3, ze kterého lze snadno určit referenční teplotu pro naměřené napětí. Dále pak byly hodnoty teploty na čidle přepočítávány z napětí podle rovnice (6.3).

Hodnoty, které byly získány přes odhad teplotního profilu kanálu, a hodnoty ze zařízení měly odchylky přibližně do 2 °C. Dá se tedy říci, že senzor pracuje správně. Na obrázcích níže je ukázáno, jak vypadala měřící soustava a jak byl osazen senzor termočlánky:



Obrázek 6.11: Měřící soustava



Obrázek 6.12: Osazení čidla termočlánky

7 Závěr

V rešerší části, která byla popsána v kapitolách 4 a 5 bylo popsáno několik principů, které se využívají k měření teploty. Kapitola 4 se spíše zabývala nepoužívanějšími a komerčními senzory, které lze nalézt téměř v každé aplikaci, která vyžaduje kontrolu teploty. Kapitola 5 byla věnována senzorům, které jsou v současné době zpracovávány jako vyvíjené senzory. Všechny tyto senzory jsou schopny snímat teplotu na větším rozsahu, než současné komerční senzory. Odporový senzor, který se používá při vývoji chytrého oblečení, je schopen i měřit střední teplotu. U ostatních je potřeba toto měření provádět při zpracování signálu softwarově.

V praktické části v kapitole 6 byl vypracován návrh na zařízení pro měření střední teploty v kanále s proudícím vzduchem o libovolném průměru. Nejprve byl vybrán princip měření, tedy princip měření elektrického odporu kovového drátu, který je závislý na teplotě. Jako materiál byla zvolena měď kvůli dostupné technologii výroby desek plošných spojů, kde je dosaženo potřebných parametrů pro senzor. Návrh senzoru byl proveden v programu EAGLE a byl vyroben tak, aby bylo možné nastavit jeho délku, na které bude snímat data. Pro propojení senzoru byl také vyroben mechanický konektor. Parametry senzoru byly ověřeny při jednoduchém testování potřebných vlastností, což byla linearita a výdrž senzoru, kterých bylo dosaženo.

Elektronika pro teplotní senzor byla navržena tak, aby splňovala potřeby pro měření teploty a aby bylo možné změnit její nastavení při změně snímací plochy. Byla navržena DPS v programu EAGLE, osazena součástkami a vhodně naprogramována. Do zařízení byl implementován akumulátor s potřebnými ochranami a potřebným příslušenstvím pro správný chod celého zařízení. Byla vytvořena komunikace s počítačem pomocí USB připojení a dále aplikace, díky které je možné zařízení nastavit a měřit data.

Po návrhu a výrobě bylo zařízení zkalibrováno a otestováno v kanále s proudícím vzduchem. Testování bylo provedeno při odhadování teplotního profilu a porovnávání středních hodnot. Test proběhl úspěšně, kdy nejvyšší odchylka teplotního čidla od odhadované střední teploty byla 2 °C. Lze tedy říci, že senzor je schopen snímat střední teplotu v kanále s proudícím vzduchem.

Povedlo se tedy vyrobit kompletní elektroniku, která je kompatibilní s jakýmkoliv odporovým senzorem, pokud budou upraveny kalibrační hodnoty a hodnota zesílení operačního zesilovače.

Jako možné vylepšení je možné podle potřeby navrhnout vlastní teplotní senzor z libovolnými rozměry, které budou sloužit jasné aplikaci. Pro přesnější měření teploty by bylo vhodné implementovat do zařízení lepší AD převodník.

8 Seznam použitých zdrojů

- [1] ÇENGEL, Yunus A., Robert H. TURNER a John M. CIMBALA. Fundamentals of thermal-fluid sciences. 3rd ed. Boston: McGraw-Hill, 2008. ISBN 978-0-07-126631-4.
- [2] [online]. b.r. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://www.thoughtco.com/what-is-absolute-zero-604287>
- [3] Inn arts convection clipart. In: Ghibli wallpapers [online]. b.r. [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <http://inn.spb.ru/convection-clipart/img130082464CE>
- [4] VLACH, Radek. Tepelné procesy v mechatronických soustavách. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-3976-4.
- [5] ČSN 25 8005. Názvosloví z oboru měření teploty. 2. Úřad pro normalizaci a měření, 1989.
- [6] Odporové čidlo platinové. In: Elektronická učebnice: Snímače Teploty [online]. b.r. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/959>
- [7] Přehled principů el. měření teploty - 1. díl. *Automatizace.hw.cz* [online]. Antonín Vojáček, 2014 [cit. 2019-04-11]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/prehled-principu-el-mereni-teploty-1-dil>
- [8] Charakteristika odporu termistoru na teplotě. In: Parallax forum [online]. b.r. [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://forums.parallax.com/discussion/118967/interpreting-non-linear-temperature-thermistor-value>
- [9] KREIDL, Marcel. Měření teploty: senzory a měřící obvody. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-145-4.
- [10] POLANSKÝ, R., R. SOUKUP, J. ŘEBOUN et al. A novel large-area embroidered temperature sensor based on an innovative hybrid resistive thread. *Sensors and Actuators A: Physical* [online]. 2017, **265**, 111-119 [cit. 2019-03-14]. DOI: 10.1016/j.sna.2017.08.030. ISSN 09244247. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924424717302984>
- [11] Fiber Bragg Grating. Boteg [online]. b.r. [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: <https://www.boteg.cz/cz/fiber-bragg-grating/>

- [12] WADA, Daichi, Jun-ichi SUGIYAMA, Hiroaki ZUSHI a Hideaki MURAYAMA. *Temperature* distribution monitoring of a coiled flow channel in microwave heating using an optical fiber sensing technique. *Sensors and Actuators B: Chemical* [online]. 2016, 232, 434-441 [cit. 2019-03-14]. DOI: 10.1016/j.snb.2016.03.156. ISSN 09254005. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925400516304506>
- [13] Distributed Temperature Sensing A DTS Primer for Oil & Gas *Production. 1.* Missouri, Texas: Smolen Associates, 2003.
- [14] HOLÍK, Tomáš. Distribuované optické vláknové senzory. Brno, 2018. *Diplomová práce*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. Petr Münster, Ph.D.
- [15] Resistivity and Conductivity. Engineering ToolBox [online]. 2001 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/resistivity-conductivity-d_418.html
- [16] TUREK, Luboš. Použití ACO algoritmu na řešení jednoduché substituční šifry. *Praha*, 2012. Bakalářská práce. Univerzita Karlova v Praze, Matematicko-Fyzikální Fakulta.
- [17] Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm. The Faculty of *Engineering of Erciyes* University [online]. Erciyes, Turkey: The Faculty of Engineering of Erciyes University, 2010 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://mf.erciyes.edu.tr/abc/>
- [18] MIŠKAŘÍK, Kamil. Včelí algoritmus. Brno, 2010. Bakalářská *práce*. Vysoké Učení Technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky.

9 Seznam použitých veličin a konstant

Veličina	Symbol	Jednotky
Teplo (Energie)	E	J
Hmotnost	m	kg
Měrná tepelná kapacita	c	$J \cdot kg^{-1} \cdot W^{-1}$
Teplota	T	$^{\circ}C, K$
Tepelný tok (Výkon)	q	W
Měrná tepelná vodivost materiálu	λ	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
Plocha	S	m^2
Součinitel přestupu tepla	α_q	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
Emisivita prvku	ε	$[-]$
Tepelný odpor	R_T	$K \cdot W^{-1}$
Délka	L	m
Čas	t	s
Hustota materiálu	ρ	$kg \cdot m^{-3}$
Objem	V	m^3
Časová konstanta	τ	s
Rychlost	v	$m \cdot s^{-1}$
Poloměr	r	m
Rychlostní profil	u	$m \cdot s^{-1}$
Reynoldsovo číslo	Re	$[-]$
Hydraulický průměr	D_H	m
Viskozita	ϑ	$m^2 \cdot s^{-1}$
Obvod	o	m
Nusseltovo číslo	Nu	$[-]$
Prandtlovo číslo	Pr	$[-]$
Teplotní součinitel odporu	α	K^{-1}

Elektrický odpor	R	Ω
Veličina	Symbol	Jednotky
Proud	I	A
Napětí	U	V
Teplotní roztažnost materiálu	β	K^{-1}
Index lomu světla	n	$[-]$
Citlivost	K	$V \cdot W^{-1}$
Zářivý tok	Φ	W
Frekvence	f	Hz
Výkonový ekvivalent	NEP	$W \cdot Hz^{-\frac{1}{2}}$
Detektivita	D	$W^{-1} \cdot Hz^{1/2}$
Normovaná detektivita	D^*	$W^{-1} \cdot m \cdot Hz^{1/2}$
Perioda	Λ	s
Difrakční řád	m_d	$[-]$
Měrný elektrický odpor materiálu	ρ_e	$\Omega \cdot m$
Elektrická vodivost	γ	$\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$
Konstanta	Symbol	Hodnota
Stefan-boltzmannova konstanta	σ	$5.67 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$
Kritické Reynoldsovo číslo	Re_{cr}	2300
Boltzmannova konstanta	k	$1.38 \cdot 10^{-23} J \cdot K^{-1}$
Rychlost světla	c_v	$3 \cdot 10^8 m \cdot s^{-1}$

10 Seznam zkratek

ČSN	Česká technická norma
Ni	Nikl
Fe	Železo
Ni-Fe	Sloučenina niklu a železa
NTC	Negative temperature coefficient – Záporný teplotní koeficient
IEC	International electrical commission – mezinárodní komise pro normování elektromateriálů
NiCr	Sloučenin niklu a chromu
NiAl	Sloučenina niklu a hliníku
Cu	Měď
CuNi	Sloučenina mědi a niklu
PtRh	Sloučenina platiny a rhodia
OVS	Optické vláknové senzory
NEP	Noise equivalent power - Výkonový ekvivalent
BiSb	Sloučenina bismutu a antimonu
TGS	triglycin-sulfát
AISI	American iron and steel institut – americké normy pro železo a oceli (zastaralé)
FBG	Fiber Bragg grating - Braggova optická vláknová mřížka
DTS	Distribuované teplotní snímání
OTDR	Optical Time Domain Reflectometry
OFDR	Optical Frequency Domain Reflectometry
DPS	Deska plošných spojů
USB	Universal serial bus – univerzální sériové rozhraní
UART	Universal asynchronous receiver and transmitter – Asynchronní sériové rozhraní
Li-pol	Lithium-polymerový akumulátor

AD převodník	převodník analogového signálu na digitální
RC-filtr	Rezistorový a kondenzátorový filtr vysokofrekvenčního šumu
I ² C	Inter-integrated circuit = počítačová sériová sběrnice pro více zařízení najednou
MIPS	Million instructions per second – milion instrukcí za sekundu, výkon mikrokontroléru

11 Seznam obrázků a grafů

11.1 Seznam obrázků

Obrázek 2.1: <i>Demonstrace přenosu tepla kondukcí, konvekcí a radiací [3] ...</i>	- 13 -
Obrázek 3.1: <i>Rychlostní profil turbulentního (vlevo) a laminárního proudění</i>	- 18 -
Obrázek 3.2: <i>Ukázka teplotního profilu proudící tekutiny při ohřevu</i>	- 20 -
Obrázek 4.1: <i>Rozdělení teplotních čidel.....</i>	- 22 -
Obrázek 4.2: <i>Schéma jednoduchého zapojení teplotního čidla</i>	- 24 -
Obrázek 4.3: <i>Odporové platinové čidlo [6].....</i>	- 24 -
Obrázek 4.4: <i>Seebeckův jev u termoelektrického článku</i>	- 26 -
Obrázek 5.1: <i>Tvar a velikost teplotního senzoru.....</i>	- 30 -
Obrázek 5.2: <i>Schéma měření FBG senzorem.....</i>	- 32 -
Obrázek 5.3: <i>Rozptylové spektrum světelného signálu při odrazu</i>	- 34 -
Obrázek 6.1: <i>Senzor teploty: a) návrh v EAGLE b) detail c) reálný senzor</i>	- 38 -
Obrázek 6.2: <i>mechanický konektor mezi senzorem a elektronickým zařízením-</i>	- 39 -
Obrázek 6.3: <i>Sestava pro testování teplotního čidla.....</i>	- 40 -
Obrázek 6.4: <i>Schéma zapojení snižujícího měniče</i>	- 43 -
Obrázek 6.5: <i>Schéma snímání a zesilování signálu</i>	- 44 -
Obrázek 6.6: <i>Návrh DPS v programu EAGLE.....</i>	- 46 -
Obrázek 6.7: <i>Vnitřní struktura zařízení a) zepředu b) zezadu</i>	- 47 -
Obrázek 6.8: <i>Výsledné elektronické zařízení</i>	- 47 -

11.2 Seznam Grafů

Graf 4.1: <i>Závislost odporu termistoru na teplotě [8].....</i>	- 26 -
Graf 5.1: <i>Závislost odporu Pt1000 a ocelového drátu na čase.....</i>	- 31 -
Graf 5.2: <i>Teplotní data z FBG senzoru během při ohřevu.....</i>	- 33 -
Graf 6.1: <i>Charakteristika závislosti odporu na teplotě pro rozměr 200mm</i>	- 41 -
Graf 6.2: <i>Charakteristika závislosti odporu na teplotě pro rozměr 150mm</i>	- 41 -

12 Seznam Příloh na CD

Příloha 1: Schéma senzoru v programu EAGLE

Příloha 2: Schéma elektronického zařízení v programu EAGLE

Příloha 3: Firmware zařízení v programu Matlab Simulink

Příloha 4: Instalační program aplikace

Příloha 5: Návod k použití pro zařízení